



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

ZKOUŠENÍ POJIV TEPELNÝCH IZOLACÍ PRO SPECIÁLNÍ APLIKACE NA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍCH

TESTING OF BINDERS OF THERMAL INSULATIONS FOR SPECIFIC APPLICATIONS ON TECHNICAL
APPLIANCES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

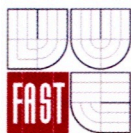
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN MAŇÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VÍT PETRÁNEK, Ph.D.

BRNO 2014



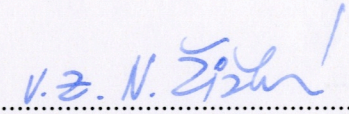
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště Ústav technologie stavebních hmot a dílců

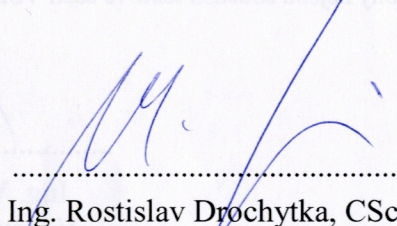
ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Jan Maňák
Název Zkoušení pojiv tepelných izolací pro speciální aplikace na technických zařízeních
Vedoucí bakalářské práce Ing. Vít Petránek, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2013
Datum odevzdání bakalářské práce 30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013


.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Provis, John L.; van Deventer, Jannie S. J. Geopolymers – structure, processing, properties and industrial applications, Woodhead Publishing 2009, ISBN 978-1-84569-449-4

Hung T. D. Thermal silica-based geopolymer composite system: study of processing and mechanical properties, Disertační práce, TU Liberec 2010.

Duxson P. and col. Geopolymer technology: the current state of the art, Journal of Materials Science, May 2007, Volume 42, Issue 9, pp 2917-2933

Wein, O. Úvod do reologie, Malé centrum, 1996, ISBN 8023809288.

Odpovídající normy ČSN

<http://www.google.research.cz>

<http://www.science direct.com>

<http://www.knovel.com>

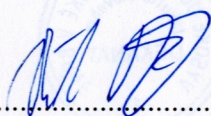
Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

V bakalářské práci bude zpracován úvod do problematiky geopolymerních materiálů a dále vypracována rešerše zaměřená zejména na zkoušení reologie geopolymerních pojiv včetně úvodu do problematiky reologie a srovnání jednotlivých metod stanovování. Práce bude obsahovat i praktickou část měření na konkrétních materiálech. V závěru práce bude shrnuta problematika zkoušení tohoto specifického materiálu v čerstvém stavu, případně doporučení na zlepšení postupu zkoušení. Práce by měla být zpracována v rozsahu přibližně 40 stran.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



.....
Ing. Vít Petránek, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Práce se zaměřuje na zkoušení alkalicky aktivovaných pojiv tepelných izolací pro speciální průmyslová zařízení. Zpočátku je uveden konkrétní příklad, ve kterém se mohou vyskytovat tyto specifické tepelně izolační materiály. Jedná se zejména o aplikace pro tepelné zásobníky. Následně jsou připojeny dvě ukázky již vybudovaných staveb, využívající ke svému prospěchu právě tepelných zásobníků. Největší důraz je však věnován reologii pojiva v čerstvém stavu a jeho tuhnutí. Je rozvedeno několik metod, jejichž vhodnost použití je shrnuta v závěru práce. Později je v textu přidána praktická zkušenost z vlastního testování tohoto materiálu a na úplný konec je zařazeno praktické ověření funkčnosti zkoušeného materiálu.

Klíčová slova

Alkalicky aktivovaná pojiva, geocementy, geopolymery, tepelně izolační materiály, geopolymerizace, tepelné zásobníky, reologie, viskozita.

Abstract

This work focus on testing alcali-activated binders for thermal insulation which could be used for special industry devices. In the begining of this work is presented example of thermal energy storage where these specific alcali-activated materials can be used. Ensuingly two construction with thermal energy storage tanks are mentioned. Most of the interest aims on ageing and rheological properties of alcali-activated binder. Some rheological methods are also discussed. In the end of this work is added practical experience.

Keywords

Alcali-activated binders, geocements, geopolymers, thermal insulating materials, geopolymerisation, thermal energy storage, rheology, viscosity.

Bibliografická citace VŠKP

Jan Maňák *Zkoušení pojiv tepelných izolací pro speciální aplikace na technických zařízeních*. Brno, 2014. 46 s., 00 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Vít Petránek, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27.5.2014

.....
podpis autora
Jan Maňák

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod..... | 3 |
| <u>Teoretická část</u> | |
| 1 Tepelné zásobníky (TES – thermal energy storage)..... | 4 |
| 1.1 Senzibilní tepelné skladování - sensible heat storage (SHS)..... | 5 |
| 1.2 Latentní skladování tepla - latent heat (phase change) storage (LHS)..... | 6 |
| 1.3 Konstrukce tepelných zásobníků..... | 7 |
| 1.3.1 Nosná vrstva zásobníku | 8 |
| 1.3.2 Tepelně izolační vrstva zásobníku..... | 9 |
| 1.3.3 Kapsle pro skladování média..... | 10 |
| 2 Praktické příklady Realizovaných elektráren využívající tepelné zásobníky | 11 |
| 2.1 Gemasolar..... | 11 |
| 2.2 Valle 1 a Valle 2 | 13 |
| 3 Geopolymerní pojiva | 15 |
| 3.1 Historie a vývoj geopolymérů | 15 |
| 3.2 Vstupní látky..... | 16 |
| 3.2.1 Metakaolin | 16 |
| 3.2.2 Aktivátory | 17 |
| 3.2.3 Křemelina | 17 |
| 3.3 Podstata geopolymeryzace | 18 |
| 3.4 Odolnost geopolymérů ke zvýšeným teplotám..... | 19 |
| 4 Reologie materiálů | 20 |
| 4.1 Fordův pohárek | 24 |
| 4.2 Rozlití válečkem | 25 |
| 4.3 Hmotnostní penetrace | 25 |
| 4.4 Reometry..... | 26 |

Experimentální část

| | | |
|-------|--|----|
| 5 | Metodika práce..... | 28 |
| 5.1 | Příprava alkalicky aktivovaného pojiva..... | 29 |
| 5.2 | Zkoušení reologie alkalicky aktivovaného pojiva..... | 30 |
| 5.2.1 | Fordův pohárek..... | 30 |
| 5.2.2 | Rozlití válečkem..... | 31 |
| 5.2.3 | Hmotnostní penetrace | 31 |
| 5.3 | Zkoušení vlastní soudržnosti a přídžnosti materiálu k podkladu | 33 |
| 5.4 | Ověřování funkčnosti materiálu v praxi | 35 |
| 6 | Diskuze výsledků | 37 |
| | Závěr | 40 |
| 7 | Seznam použité literatury..... | 41 |
| 8 | Seznam obrázků | 45 |

ÚVOD

Zvyšující se množství skleníkových emisí a rostoucí cena fosilních paliv jsou hlavními příčinami vedoucí k vývoji a praktickému využití různých druhů z obnovitelných zdrojů energie.

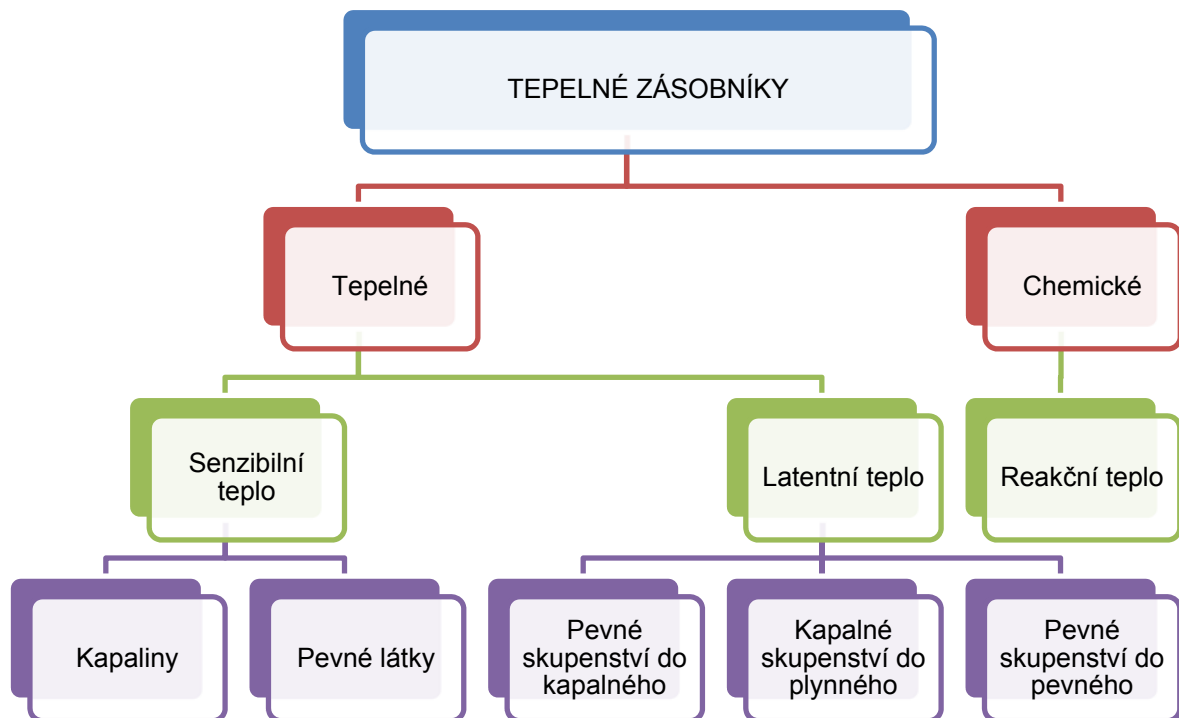
Ve většině světa se přímé sluneční záření jeví jako nejefektivnější zdroj získávání energie. V České republice slouží k využívání sluneční energie fotovoltaické elektrárny, které sluneční záření přímo transformují v energii elektrickou. Sluneční záření může být ovšem skladováno, ne však samo o sobě - je potřeba jej přeměnit na jiný typ energie, přičemž přeměna sluneční energie do tepelné energie je nejjednodušší cestou. K tomuto účelu a k účelu skladování energie právě slouží tepelné zásobníky. V nich může být energie skladována buď krátkodobě (v řádech dnů) či dlouhodobě (v řádech týdnů, měsíců až sezón) a to několika způsoby: tepelně, elektricky, chemicky, mechanicky atd. V práci bude rozvedeno pouze tepelné ukládání energie. K tepelnému ukládání energie a jejímu skladování je potřeba tepelný zásobník dobře zaizolovat. Může se vyskytovat několik vhodných druhů tepelné izolace, které splňují požadavky pro zateplení tepelných zásobníků. Ty budou v práci pouze okrajově zmíněny, pozornost bude hlavně věnována alkalicky-aktivovaným pojivům, které po rozmíchání s izolačním plnivem (např. perlit) mají slibné předpoklady k vytvoření odolné ekologicky nezávadné tepelné izolace, jejíž aplikace bude všestranná.

Teoretická část

Technická zařízení, jejichž provozní teploty se pohybují v rozmezí od cca 80 – 500 °C je z ekonomického hlediska zapotřebí zaizolovat vhodnou tepelnou izolací. Mezi taková zařízení patří například různé druhy pecí, galvanizátory, komíny apod., avšak jedním z hlavních novodobých směrů, kde lze hledat potenciál v uplatnění alkalicky aktivovaných tepelně izolačních materiálů jsou tepelné zásobníky určené ke skladování tepla zejména pak u slunečních elektráren. Elektrárny tohoto typu již byly v minulosti vybudovány na území Španělska a jiných států.

1 TEPELNÉ ZÁSOBNÍKY (TES – THERMAL ENERGY STORAGE)

Tepelný zásobník je zařízení, které má schopnost naakumulovat energii v různé podobě a podle potřeby ji zpětně uvolňovat. Regulací mezi poptávkou a nabídkou energie zlepšuje tepelný zásobník výkon a spolehlivost energetického systému. V tepelných zásobnících je energie uskládána do akumulčního média, které tím mění svoji teplotu, potenciální energii nebo kombinaci obou. Změna teploty může být doprovázena i změnou skupenství (latentní teplo). Tepelný zásobník se skládá zpravidla z akumulčního média, obálky, tepelné izolace, tepelných výměníků a jiných zařízení. [1] Nejběžnějším rozdělením tepelných zásobníků je na senzibilní (citelné) uložení tepelné energie a uskladnění tepla latentního. Tepelné zásobníky se dají dále podle teploty média dělit následovně: nízkoteplotní (do 100 °C), středně teplotní (od 100 °C do 500 °C) a vysokoteplotní (nad 500 °C). Další dělení může být podle délky doby skladovaného média na: krátkodobé (od několika hodin do několika dnů) a dlouhodobé (od několika dnů po několik ročních období). Kvůli tepelným ztrátám je nejvýhodnější projektovat tepelné zásobníky krátkodobé. Energie získaná z tepelných zásobníků je zpravidla menší než energie vložená.



Obr. 1: Na schématu je patrné rozdělení tepelných zásobníků na jednotlivé typy

1.1 SENZIBILNÍ TEPELNÉ SKLADOVÁNÍ - SENSIBLE HEAT STORAGE (SHS)

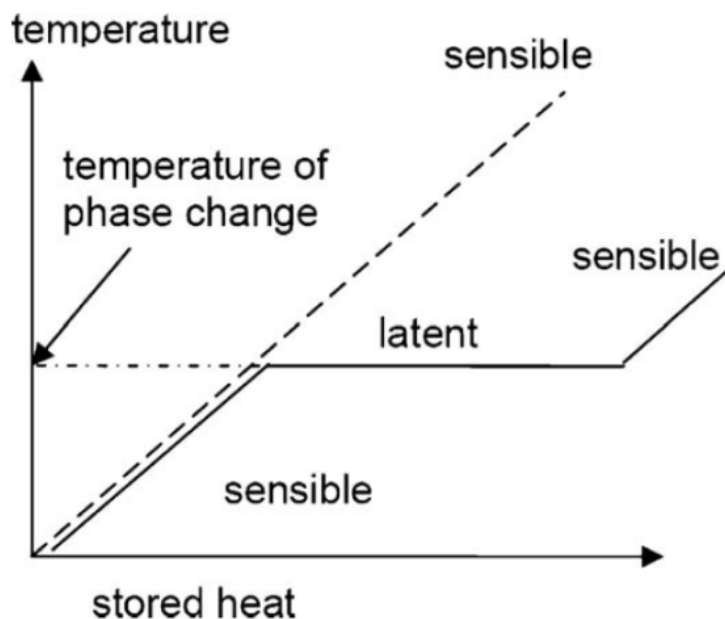
Realizace senzibilních zásobníků je nejběžnější a nejjednodušší způsob přímého ukládání tepla. Tepelná akumulace musí být vratná a opakovatelná přes spoustu nabíjecích a vybíjecích cyklů. [1] Ke svému principu používá pokud možno co největší tepelnou kapacitu materiálů, do kterých je teplo skladováno bez přeměny jejich skupenství. Akumulačním materiálem může být kapalina nebo pevná látka. Použití pevných látek s sebou často nese výhodu ve formě cenové dostupnosti. Lze totiž bez větších problémů použít laciný kámen, písek, cihly, beton, odlévanou keramiku, dokonce i vlhkou či suchou hlínu. Nevýhodu lze spatřit v potřebě transportního média, které teplo roznáší. V takových případech hovoříme o dvojitých systémech. Beton je obzvláště příznivý z hlediska své ceny, jednoduchého zpracování, vysoké tepelné kapacity a pevnosti v tlaku, dále podobnému součiniteli teplotní roztažnosti s ocelí (obzvláště docenitelné v kombinaci s použitím potrubí) a vysoké mechanické odolnosti vůči cyklickému zahřívání. [2] Nejběžnější kapalinou je voda z důvodu velké tepelné kapacity a její nízké ceny, dále termický olej, tekuté soli a tekuté kovy. Kapaliny si zachovávají svoji přirozenou vrstevnatost po výšce průřezu z důvodu rozdílné hustoty teplé a chladné kapaliny. To, že se vyskytuje teplotní

gradient je žádoucí z hlediska odběru a dodávek. Ohřáté médium budeme dodávat do horní části zásobníku, zatímco odebírat budeme chladné médium ze spodní části. [2] Malá tepelná jímavost akumulčního média s sebou přináší zvětšené nároky na skladovací velikost, což stojí větší množství financí a způsobuje více problémů s tepelnými ztrátami. Hlavními faktory, určujícími výběr správného média jsou zejména tyto následující: [1]

- vysoká objemová hmotnost a tepelná kapacita
- netoxičnost, kompatibilita materiálu ke konstrukci, nehořlavost
- dostupnost, příznivá cena
- mechanická i chemická stabilita

1.2 LATENTNÍ SKLADOVÁNÍ TEPLA - LATENT HEAT (PHASE CHANGE) STORAGE (LHS)

U tohoto systému je tepelná energie uchovávána za téměř konstantní teploty média. Tento děj může nastat tehdy, pokud médium přechází z jedné stabilní fáze v druhou. Čili pokud se mění např. fáze tuhá v tekutou a obráceně. Tento děj však nenastává skokově, protože se materiál postupně rozpouští a tudíž trvá jistou časovou dobu. Množství tepla, které se spotřebuje na fázovou přeměnu materiálu, se označuje jako latentní. Oproti senzibilnímu skladování je zde hlavní výhodou možnost větší akumulace tepla, a to asi 5 – 14 krát. [3] Problémem však zůstává nárůst objemu média při přechodu do jiné fáze a také malá tepelná vodivost, která vede ke zpomalování nabíjení a vybíjení zásobníku. [2]

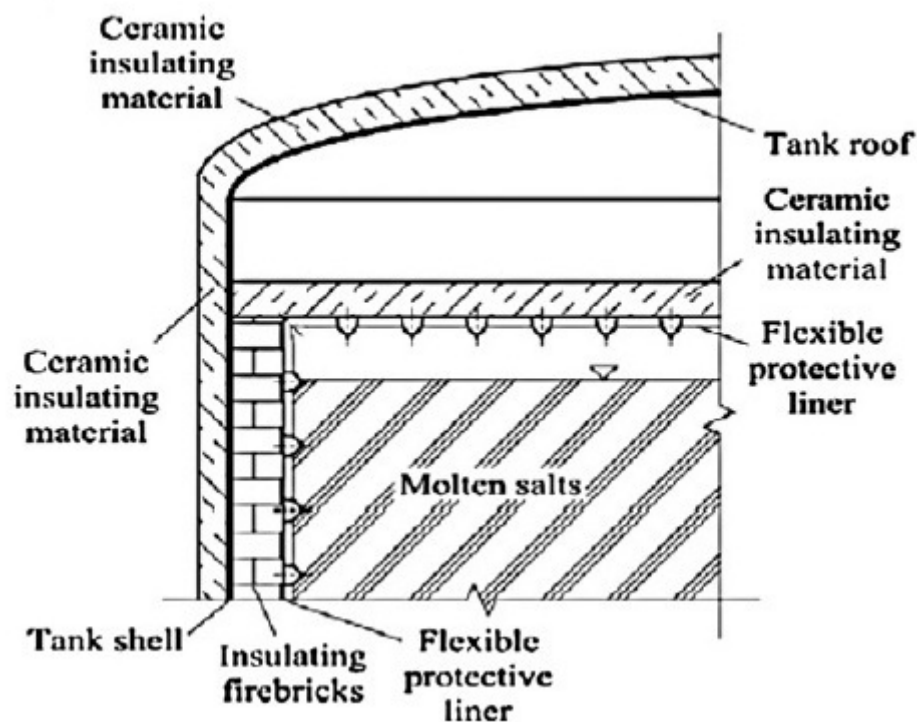


Obr. 2: Na grafu je patrný rozdíl v množství pojmutoho tepla mezi senzibilním systémem a systémem latentním. Lze z něj též vyčíst teplotu skupenské přeměny média.

1.3 KONSTRUKCE TEPELNÝCH ZÁSOBNÍKŮ

Konstrukce jednotlivých zásobníků se zpravidla liší podle potřeby konkrétní sluneční elektrárny nebo daného specifického požadavku. Rozdíl také tvoří to, v jaké formě je teplo ukládáno. Pro zásobníky, využívající teplo skupenské přeměny není třeba navrhovat tepelnou izolaci obzvláště silnou, jako u zásobníků pro skladování latentního tepla, protože vnitřní médium nemusí dosahovat tak vysoké provozní teploty. U senzibilních zásobníků je však potřeba věnovat dostatečnou pozornost tepelné izolaci, obzvláště pokud teplota uvnitř zásobníku dosahuje vysokých hodnot (i přes 500 °C). Tepelné zásobníky pro senzibilní skladování s kapalným médiem mohou být dvojího typu. Ten jednodušší je jednonádržový, využívající přirozené vertikální rozvrstvenosti kapaliny v závislosti na její teplotě. Druhý typ je dvounádržový, jehož principem jsou dva rezervoáry: jeden pro chladné médium a druhé pro již ohřáté médium, přičemž teplotní rozdíl mezi jednotlivými nádrži je až několik set °C. Gabrielli et al. [4] studovali optimální konstrukci tepelných zásobníků pro roztok tekutých solí. Ukázalo se, že nejlepší konstrukce je vnitřně tepelně zaizolovaná ocelová konstrukce s maximální možnou výškou a průměrem 22,4 m.

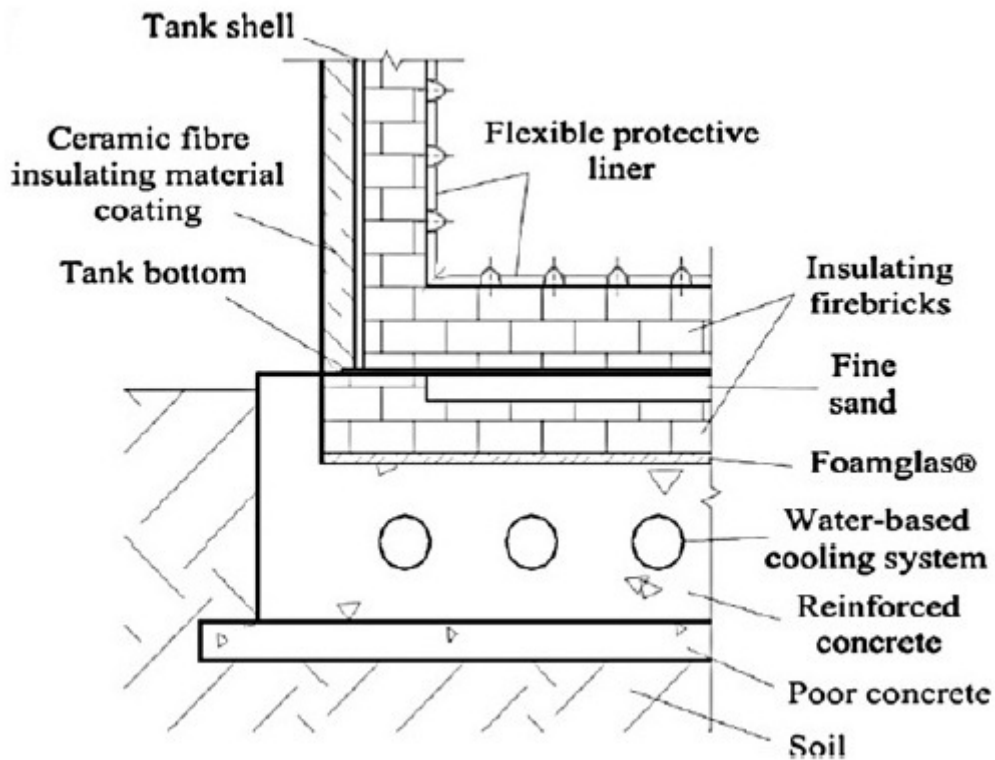
Pokud se budeme zabývat návrhem tepelných zásobníků, pak každý z nich musí mít tyto základní vrstvy: vrstvu únosnou, která tvoří nosnou schránku zásobníku, jež nese vrstvu následující - vrstvu tepelně izolační, která zabezpečuje minimální ztráty tepla a jejíž hlubším návrhem se bude práce zabírat a nakonec kapsle, v níž je skladováno samotné médium určené k uchování tepelné energie. Samotné provedení musí být samozřejmě co nejlevnější, aby se investice do podobných zařízení staly efektivní.



Obr. 3: Obrázek zobrazuje horní roh tepelného zásobníku o klasickém uspořádání vrstev.

1.3.1 Nosná vrstva zásobníku

Účelem nosné vrstvy zásobníku není nic jiného, než pouze přenášet zatížení vyvolané z hmotnosti kapaliny a tlaků na boční stěny nádrže do země. Může být postavena ze železobetonu, anebo jiných dostatečně pevných materiálů. Únosnost zdí je zásadní při případném zavěšení kapslí tak, aby prostor mezi samotnou kapslí a únosným zdivem mohl být vyplněn tepelně izolačním materiálem, na který by nepůsobil žádný tlak.



Obr. 4 Zde je zobrazen spodní roh tepelného zásobníku.

1.3.2 Tepelně izolační vrstva zásobníku

Funkcí tepelně izolační vrstvy je pochopitelně omezení tepelného toku z média do okolního prostředí. Její realizace může být provedena nesčetnými způsoby, v závislosti na tom, zda má být vrstva únosná pro kapsli na skladovací médium; do jakých teplot musí izolace být funkční; její cenové dostupnosti, proveditelnosti apod. Tloušťka tepelné izolace by v závislosti na použitém materiálu, délky doby skladování a provozní teplotě média měla být od 100 do 300 mm. U zásobníků, ve kterých nebude vyvíjen tlak z tíhy kapsle s médiem na tepelnou izolaci, lze snadno a lacině realizovat tepelně izolační zásypy. Pokud by se meziprostor určený k tepelné vrstvě povedlo udělat hermeticky neprodyšný, šlo by zásyp i vakuovat, čímž by se výrazně zvýšila účinnost zásypu.

V případě zateplení tepelných zásobníků se mohou nabízet zejména následující materiály:

- Jako nejjednodušší, cenově nejdostupnější a relativně účinná řešení se zdají být již zmíněné **zásypy**. Ty mohou být realizovány prakticky všemi přírodními i uměle vyráběnými kamenivými jako např. **expandovaným perlitem**,

vermiculitem, drcenou pemzou, tufy a jinými. Jejich součinitele tepelné vodivosti λ se pohybují v řádu desetin W/(m·K).

- Mezi další z možných variant se jeví použití **pěnového skla FOAMGLAS®**. Je vyrobeno z anorganických materiálů (vybrané recyklované sklo) a lze ho proto i snadno recyklovat. Pevnost v tlaku vykazuje okolo 1 MPa. Tento materiál je odolný do teploty 1000 °C, dá se lehce opracovávat obyčejnou pilou, je tvarově stálý a jeho tepelná roztažnost je podobná oceli. Jeho další přednost je chemická odolnost, obdobná běžnému sklu. Jeho objemová hmotnost se pohybuje okolo 115 kg/m³, přičemž součinitel tepelné vodivosti λ je menší nebo roven hodnotě 0,041 W/(m·K). [24]
- Použití různých **minerálních a skelných vln** se zdá být také cestou. Její tepelná vodivost λ se pohybuje okolo hodnoty 0,35 W/(m·K). Důležitá je zde však její teplotní oblast použití, a to z toho důvodu, že při zvýšených teplotách materiál nedegraduje, ale ztrácí svou chemickou ochranu, která zabraňuje navlhavosti. Dnes již však existuje mnoho firem, které se zabývají výrobou vláknitých izolačních materiálů a jejich cena by neměla být příliš vysoká.
- **Kalciumsilikátové desky** by také mohly být účinným řešením pro daný problém. Jsou schopné odolávat teplotám do 1000 °C a jsou pevné. Jejich součinitel tepelné vodivosti λ se bývá v závislosti na teplotě od 0,8 do 0,14 W/(m·K). U nás je reprezentována firmou Tachtech. [25]
- Další variantou je aplikace alkalicky aktivovaných pojiv v kombinaci s některým z lehkých plniv. Jejich výhodou je poměrně vysoká pevnost, takže by se daly použít zejména u těch zásobníků, u kterých by skořepina byla položena na tepelné izolaci. K dalším výhodám lze přičíst jejich výbornou stálost a funkčnost za zvýšených teplot, jakožto i jejich chemickou odolnost k agresivnímu prostředí. Podrobnějšími vlastnostmi a podstatou těchto materiálů se práce bude zabývat v samostatné kapitole č. 3.

1.3.3 Kapsle pro skladování média

Nejvhodnějším materiálem, který by vyhovoval požadavkům na zvýšené teploty, dostatečnou únosnost a možnou agresivitu prostředí se jeví nerezová ocel a její případné slitiny. Funkcí je pojmoutí objemu média a zabezpečení nepropustnosti. Ideální tvar by měla být koule, anebo válec z toho důvodu, aby se zajistila co nejmenší plocha nutná k zaizolování.

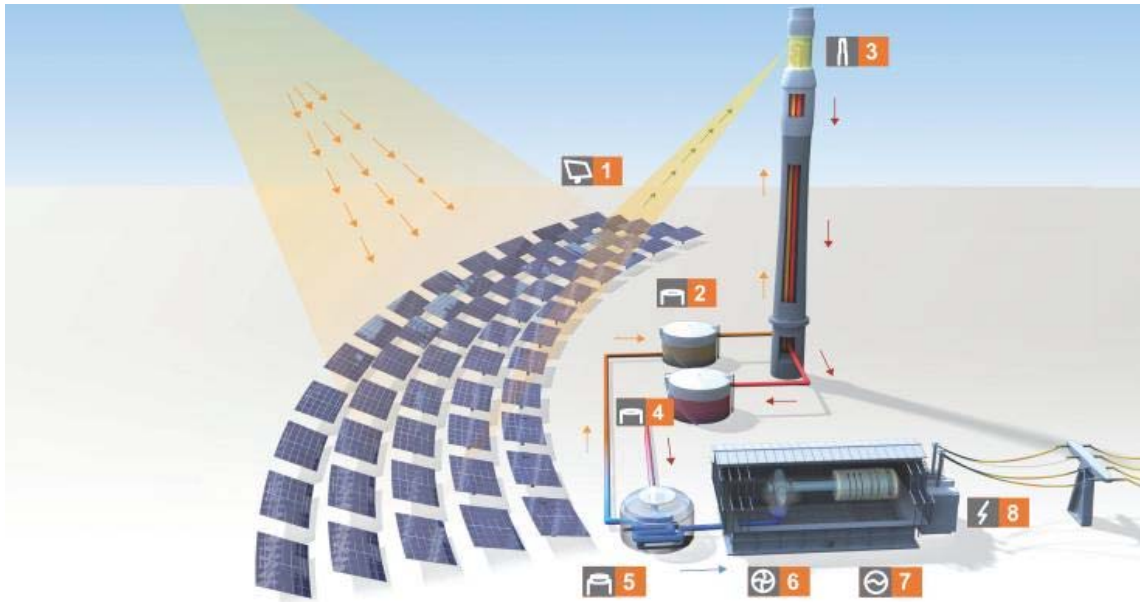
2 PRAKTICKÉ PŘÍKLADY REALIZOVANÝCH ELEKTRÁREN VYUŽÍVAJÍCÍ TEPELNÉ ZÁSOBNÍKY

Ve světě, zejména v USA či Španělsku, se již začínají objevovat sluneční elektrárny využívající tepelné zásobníky k regulaci elektrické energie a zásobování elektrickou energií domácností i v noci. Jako demonstrující zástupci byly vybrány elektrárny Gemasolar a Valle.

2.1 GEMASOLAR

Gemasolar je sluneční elektrárna, nacházející se ve španělské Andalusii a využívající ke skladování a přenosu tepla roztoky rozpuštěných solí (60 % NaNO_3 ; 40 % KNO_3). Celková zabraná plocha elektrárnou je 1,8 km². V centru 2 650 slunečních zrcadel se nalézá 140m betonová věž, do které se zaostřují odražené světelné paprsky z jednotlivých zrcadel, zde může teplota dosahovat až 900 °C. Roztok se v ohnisku ohřeje na teplotu 565 °C a putuje do zásobníku pro tepelné skladování nebo rovnou do výměníku, kde dojde k vytvoření páry. Pára následně směřuje k turbíně, která roztáčí generátor a dochází k tvorbě střídavého proudu, stejně jako u klasické elektrárny. Zchlazený roztok je odváděn do druhého zásobníku. Během nedostatečného slunečního svitu je tepelná energie čerpána ze zásob, které mohou pokrýt až 15 h výroby elektrické energie. [26]

Elektrárna byla uvedena do chodu v roce 2011 a svým výkonem téměř 20 MW zásobuje 25 000 domácností. Kapacita tepelného zásobníku je 600 MWh, což odpovídá 5 500 t roztoku solí.



Obr. 5 Na obrázku můžeme vidět schéma principu elektrárny: 1 – sluneční zrcadla; 2 – zásobník pro chladné médium; 3 – receiver – místo, do kterého se sbíhají paprsky; 4 – zásobník pro ohřáté médium; 5 – výměník tepla; 6 – turbína; 7 – generátor; 8 – rozvodná síť

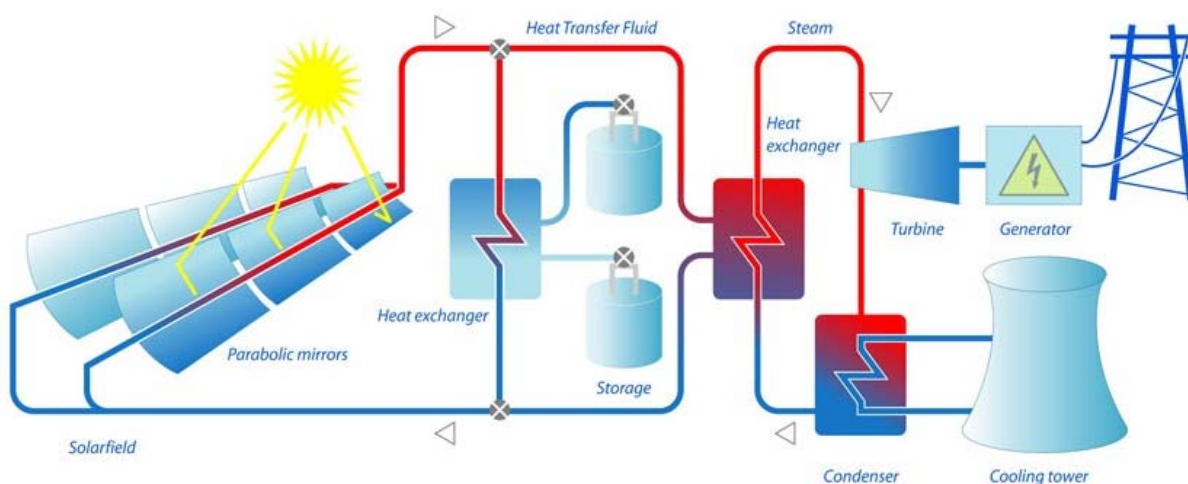


Obr. 6: Letecký snímek zachycující elektrárnu Gemasolar a její rozložení zrcadel kolem věže.

2.2 VALLE 1 A VALLE 2

Valle 1 a Valle 2 jsou sousedící parabolické sluneční elektrárny, které produkují elektrickou energii. Jsou umístěny ve Španělsku nedaleko města San José del Valle. Jejich princip je obdobný s elektrárnou Gemasolar. Zásadní rozdíl je však v tom, že jednotlivá zrcadla nejsou směřovány do jednotného bodu, nýbrž každým parabolickým zrcadlem vede v ohnisku speciální trubka s proudícím médiem, které se ohřívá. Také nevyužívá dvounádržový systém, ale slouží ji pouze jeden tepelný zásobník.

Jejich stavba byla započata v roce 2009 a do provozu byla spuštěna v roce 2012. Výkon elektráren je 50 MW a tudíž je schopna zásobovat až 80 000 domácností. [27]



Obr. 7: Schéma popisující princip elektrárny. Sluneční paprsky, které se odrážejí od parabolických zrcadel jsou koncentrovány na trubku, v níž se ohřívá médium. Ohřáté médium potom putuje buď do tepelného zásobníku, nebo rovnou k výrobě páry. Vše ostatní je již prakticky shodné s klasickými uhelnými, nebo jadernými elektrárnami.



Obr. 8: Zrcadla směřující sluneční záření do jednotného ohniska, kde dochází k ohřátí média.

3 GEOPOLYMERNÍ POJIVA

Alkalicky aktivované materiály patří mezi alternativní skupinu anorganických pojiv. Jsou to dvousložková kompozitní pojiva, kde jednou ze složek je aluminosilikát s pucolánovými vlastnostmi a druhou složkou je alkalický aktivátor, a to nejčastěji alkalický hydroxid, uhličitan nebo křemičitan (vodní sklo). Jako zdroj aluminosilikátu mohou být použity přírodní pucolány (vulkanická skla, tufy), častěji se však využívají technogenní aluminosilikátové materiály, jako je např. metakaolin. Výraznou předností těchto materiálů je jejich snadná dostupnost a do určité míry i kontrolovatelné vlastnosti. [5]

Je třeba upozornit, že v různých částech světa se názvosloví může značně lišit. Pokud hovoříme o alkalicky aktivovaných materiálech, geopolymerech, geocementech, anorganických polymerních betonech či hydrokeramice, máme zpravidla na mysli jedno a totéž.

Alkalicky aktivované systémy na bázi metakaolinu dosahují celkově nízkých pevností, ovšem výsledné materiály jsou značně odolné vůči působení vnějších vlivů, zejména proti působení mrazu, agresivních látek a vysokých teplot [10]

Alkalicky aktivované systémy jsou oproti běžným cementům mimořádně odolné vůči působení agresivních látek z vnějšího prostředí, ať se již jedná o vodu mořskou nebo odpadní. Tato korozní odolnost je zapříčiněna hutnou mikrostrukturou, minimální pórovitostí a přítomností fází zeolitického charakteru, což v rámci praktické aplikace řadí geopolymery mezi materiály použitelné do kanalizačních systémů, vlnolamů a mostních pilířů. [12].

3.1 HISTORIE A VÝVOJ GEOPOLYMERŮ

O použití geopolymery se spekuluje již při stavbě pyramid v Egyptě a zikkuratů v Mezopotámii. Novodobé výzkumy však byly zahájeny v první polovině 20. století v závodě Olsen. V téže době byl prováděn výzkum použití hydroxidu sodného a draselného v kombinaci s vysokopecní struskou jako možné přísady do portlandských cementů, načež bylo zjištěno, že přidáním alkálií vznikají nová a rychle tuhnutí pojiva. [15]

V 50. letech se výzkumem alkalicky aktivovaných strusek na Ukrajině zabýval profesor Gluchovskij, který se pak v průběhu 60. a 70. let významně podílel na identifikaci produktů solidifikace. V rámci výzkumu zjistil, že složky spolu reagují za vzniku zeolitů. Betony, vytvořené na bázi alkalické aktivace strusky touto technologií, označil názvem „gruntocementy“ a popsal je v knize „Gruntosilikáty“ vydané v roce 1959. V roce 1969 získal na přípravu těchto materiálů první patent. [16]

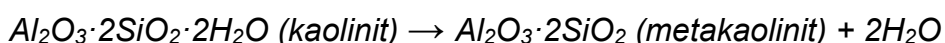
V první polovině sedmdesátých let tým francouzských vědců v čele s prof. Davidovitem a Latapiem připravili směs pro výrobu voděodolných keramických prvků, které mohly být vyráběny za teplot nižších 450 °C. Následně rozvinuli technologie založené na geosyntéze. V roce 1978 potom prof. Davidovits použil pro alkalicky aktivované materiály poprvé název geopolymery. [13,16]

3.2 VSTUPNÍ LÁTKY

Od použití vstupních látek a jejich vzájemného poměru se odvíjí výsledné vlastnosti vzniklého geopolymery. Suroviny pro přípravu geopolymery mohou být převážně látky odpadního charakteru, jako jsou elektrárenské popílků, strusky z metalurgických procesů a jiné anorganické odpady obsahující zejména amorfní SiO₂ nebo přírodní materiály jako jsou jíly, kaolíny aj. Ke každé látce je však ještě třeba přidat vhodný alkalický aktivátor. V následujícím textu budou podrobněji popsány pouze ty suroviny, se kterými bylo pracováno dále v praktické části této práce.

3.2.1 Metakaolin

Metakaolin se získává kalcinací kaolinu, což je speciální druh jílovinové zeminy s vysokým obsahem jílového minerálu kaolinitu. Kaoliny mají široké využití zejména v keramice. Po vytěžení kaolinu z ložiska se získává surový kaolin, který obsahuje asi 20 – 80 % kaolinitu, zbytek tvoří především křemen, slídy, živce a jiné druhy jílových minerálů (nejčastěji illit, montmorillonit). Ty se standardně odstraňují tzv. plavením. [14] Samotná kalcinace potom probíhá výpalem za teplot 500 – 800 °C v závislosti na čistotě a krystalitě výchozího kaolinu. [13]



Metakaolin je tedy získáván pálením hornin obsahující minerál kaolinit. Dehydroxylace kaolinitu je silně endotermní reakce a je spojena s vývojem vodní

páry. Reaktivita metakaolinu je ovlivněna zejména poměrem $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$, míře amorfní povahy a jemnosti mletí.

3.2.2 Aktivátory

Chemický aktivátor slouží ke spuštění geopolymerní reakce a hraje významnou roli v její kinetice. Prof. Glukhovskiy je rozčlenil do šesti základních skupin, přičemž M je alkalický ion. [17]

- Hydroxidy: MOH
- Soli slabých kyselin: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , atd.
- Silikáty (křemičitany): $\text{M}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$
- Alumináty: $\text{M}_2\text{O}\cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$
- Aluminosilikáty: $\text{M}_2\text{O}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot (2-6)\text{SiO}_2$
- Soli silných kyselin: M_2SO_4

Naprosto nejdostupnější a tudíž i nejběžnější je použití hydroxidu sodného a draselného (vlastnosti sodných i draselných sloučenin jsou si velmi podobné). [13] Rozpouštění obou sloučenin ve vodě je doprovázeno značným uvolňováním tepla, přičemž rozpustnost obou sloučenin se zvyšuje s rostoucí teplotou. Použití draselného aktivátoru je sice dražší, zato je však vzniklý geopolymer méně náchylný na tvorbu výkvětů a má i vyšší pevnosti v tlaku. [11,28]

Další variantou alkalické aktivace je použití vodného skla. Vodné sklo je koloidní roztok alkalických křemičitanů, vznikající rozpuštěním alkalickokřemičitého skla (nejčastěji sodného) ve vodě. Rozpustné křemičitany jsou v podstatě kombinací oxidu alkalického kovu M_2O , oxidu křemičitého SiO_2 a vody. Základní vzorec je $x\text{SiO}_2\cdot \text{M}_2\text{O}\cdot z\text{H}_2\text{O}$, kde x je stupeň polymerace a z je množství molekul vody. Křemičitan sodný nebo draselný je definován molárním poměrem $\text{SiO}_2:\text{M}_2\text{O}$, označovaným též jako silikátový modul M_s . Molární poměr obou složek u průmyslově vyráběného sodnokřemičitého skla je 2,0 – 3,3:1, což odpovídá obsahu 66 až 76 hmot. % SiO_2 . [18]

Mezi další, již méně používané alkalické aktivátory můžeme pouze encyklopedicky vyjmenovat hydroxid litný, hydroxid rubidný nebo hydroxid cesný.

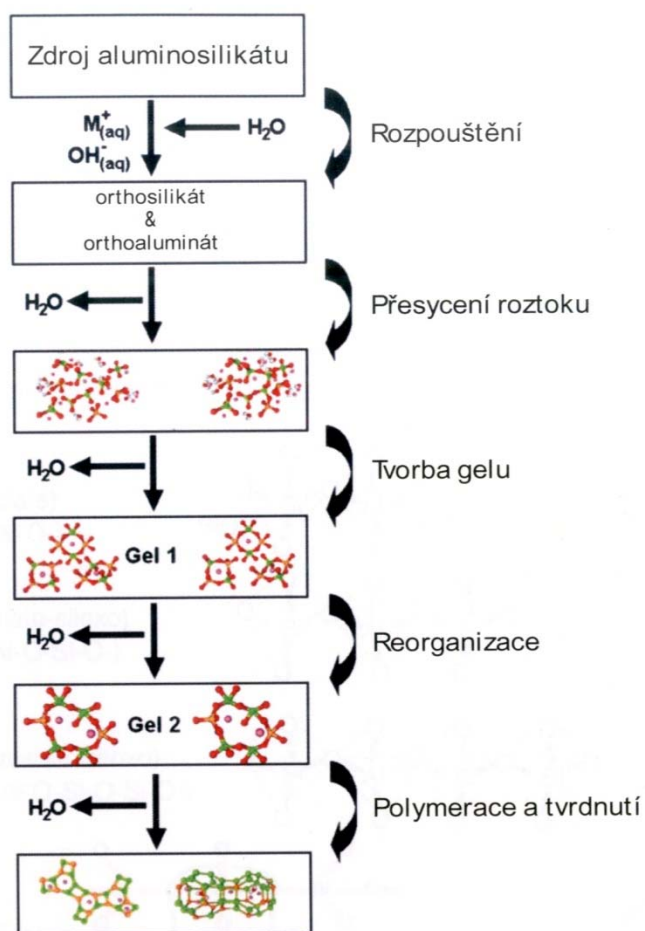
3.2.3 Křemelina

Diatomity, čili rozsivkovité zeminy, jsou horniny, které vznikly z křemičitých schránek jednobuněčných, ve vodě žijících řas, zvaných rozsivky = diatomaceae. Jsou tvořeny

z téměř amorfni kyseliny křemičité. Pro použití křemeliny ve stavebnictví je významný její obsah SiO_2 a jeho aktivita. Mimo jiné se používá také jako pucolánová přísada do maltovin či v našem případě do geopolymérů. Těží se korečkovými rypadly. [23]

3.3 PODSTATA GEOPOLYMERIZACE

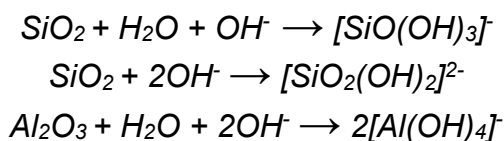
Vzhledem k tomu, že se jedná o dosti složitý proces, podstata geopolymérizace, stejně jako kinetika reakcí není ještě zcela objasněna. Avšak zjednodušeně lze říci, že reakce probíhá ve třech základních krocích v prostředí o relativně vysokém pH.



Obr. 9: Zjednodušené schéma průběhu tvorby gelu a tvrdnutí geopolyméru. [13,18]

V prvním kroku se odehrává rozpouštění aluminosilikátových surovin v zásaditém roztoku. Následuje orientace rozpouštěných složek a nakonec polykondenzace vzniklých křemičitanových a hlinitanových tetraedrů, které se vzájemně prováží kyslíkovými atomy ve vrcholech tetraedrů do trojrozměrné geopolymerní struktury amorfniho gelu, který tuhne v geopolymér. [13,18,28]

Rozpouštění amorfních aluminosilikátů za vysokého pH je rychlé, dochází k uvolňování $[Al(OH)_4]^-$, $[SiO(OH)_3]^-$ a $[SiO_2(OH)_2]^{2-}$ iontů a brzy se vytvoří přesycený aluminosilikátový roztok. Chemické rovnice lze vystihnout následovně: [28]



Monomerní složky mezi sebou v kapalně fázi kondenzují a v koncentrovaném roztoku se tvoří gel, přičemž se uvolňuje voda, která byla spotřebována během rozpouštění. Voda má funkci reakčního média, a poté přechází do pórů uvnitř gelu. Doba potřebná pro vytvoření souvislého gelu značně závisí jak na složení směsi, tak i na podmínkách syntézy. Po fázi tvorby gelu systém pokračuje v uspořádávání a reorganizaci, propojení gelové sítě se zvyšuje, což má za následek vznik aluminosilikátové struktury geopolymerů. Tyto procesy strukturální reorganizace určují konečnou mikrostrukturu a distribuci pórů v materiálu, což je rozhodující pro výsledné vlastnosti. [28]

3.4 ODOLNOST GEOPOLYMERŮ KE ZVÝŠENÝM TEPLOTÁM

Alkalicky aktivované hlinitokřemičitany mají větší odolnost ke zvýšeným teplotám než malty a betony na bázi portlandského cementu. Výzkumy prokázaly velmi dobrou tepelnou odolnost materiálů připravených z metakaolinu, křemičitanu sodného a vodného draselného skla, které mají dobrou stabilitu do teplot 1200 – 1400 °C. Odolnost ke zvýšeným teplotám je, samozřejmě, ovlivněna zvolenými vstupními surovinami. Platí, že geopolymery na bázi metakaolinu mají lepší výsledné vlastnosti, než ty, připravené z popílku. Příčinou může být vyšší čistota metakaolinu (přítomnost např. železa u popílku zapříčiňuje snížení teploty tání), vyšší reaktivita metakaolinu, případně neúplná polymerizace popílku. Použití sodného aktivátoru, na rozdíl od aktivátoru draselného, teplotu tavení geopolymeru snižuje. [13]

Dle [29] byl vyvinut speciální geocement, který v kombinaci s použitím perlitu, jako plniva, dosahuje součinitele tepelné vodivosti λ hodnot cca 0,7 W/(m·K) a objemové hmotnosti 300 kg/m³. Jeho použitelnost je až do 800 °C, přičemž dosahuje pevnosti v tlaku přes 100 kPa. To materiál podobného typu předurčuje k aplikacím na speciálních technických zařízeních, např. u zásobníků tepelné energie přidružených u slunečních elektráren, jak již bylo zmíněno dříve.

4 REOLOGIE MATERIÁLŮ

Reologie je věda o deformacích a toku hmoty, neboli fyzika deformací. Objasňuje vztahy mezi strukturou, chemickým složením a mechanickými vlastnostmi látky. Řeší vztahy mezi napětím, přetvořením a časem. [9]

Reologické chování kapalin je základním předpokladem pro pochopení procesů probíhajících v suspenzích a hraje důležitou roli v řadě technologických operací. V inženýrství má význam zejména reologie kapalin a je žádoucí upravovat reologii suspenzí podle technologie, kterou bude zpracována [21].

Postupem času se v reologii profilyvaly zejména následující disciplíny: *elementární reologie* se omezuje na triviální kinematické prototypy deformace (izotropní expanze, prostý smyk) a na jejich základě klasifikuje různé typy odchylek od klasického lineárního chování. V *reometrii* jsou reálné materiály podrobovány toku resp. deformaci za kinematicky jednoduchých podmínek s cílem získat kvantitativní informace. *Mechanika nenewtonských kapalin* studuje proudění reologicky komplexních kapalin v reálných tokových situacích, zahrnujících vliv setrvačnosti a nestabilit. Jejím cílem je konfrontace matematické předpovědi s výsledkem experimentu. *Inženýrská reologie* se zabývá deformací a prouděním reologicky komplexních materiálů v technologických procesech, obvykle s přihlédnutím k dalším transportním jevům – sdílení tepla a hmoty. Hlavním cílem je predikce chování materiálů na základě vhodných reometrických údajů a z ní vyplývající kvantitativní návrh technologie, zařízení apod. Mezi další disciplíny patří: *strukturní reologie*, *průmyslová reologie*, *racionální mechanika kontinua*. [6]

Výsledkem měření reologických vlastností je viskozita. Viskozita v podstatě říká, s jakou snadností jsou schopny molekuly kapaliny se pohybovat proti sobě. Viskozita může být ve dvou podobách. První je viskozita *dynamická*, která popisuje vnitřní tření kapaliny. Je to odpor, který klade kapalina vlastnímu pohybu (toku), anebo jinému předmětu v kapalině. Jednotkou je 1 Pa·s, což odpovídá síle nutné v kapalině k posunu 1 kg za 1 sekundu o 1 metr. Mezi kinematickou a dynamickou viskozitou existuje jednoduchý vztah. *Kinematická* viskozita je dána poměrem mezi dynamickou viskozitou a hustotou kapaliny. Její jednotka je tudíž m^2/s . [6]

Každá látka se vyznačuje při přetváření určitým druhem deformace nebo kombinací několika druhů. Zpravidla jde u reálných látek o složité děje, které se snažíme systematicky zjednodušit a objasnit na základě typů a jejich modelů. Reologické modely simulují chování různých typů hmot. Pod modelem někdy také rozumíme matematické funkce popisující toto chování, případně jejich grafické znázornění. [7]

Pro naši potřebu se bude nejvíce hodit rozdělení na modely normální (newtonské) a modely neneutonské.

Normální (newtonské) kapaliny vykazují lineární vztah mezi smykovým napětím a rychlostí deformace. V případě ideálně viskózního materiálu platí pro tečné napětí Newtonův zákon [21]. Platí pro ně rovnice

$$\tau = \eta \times D$$

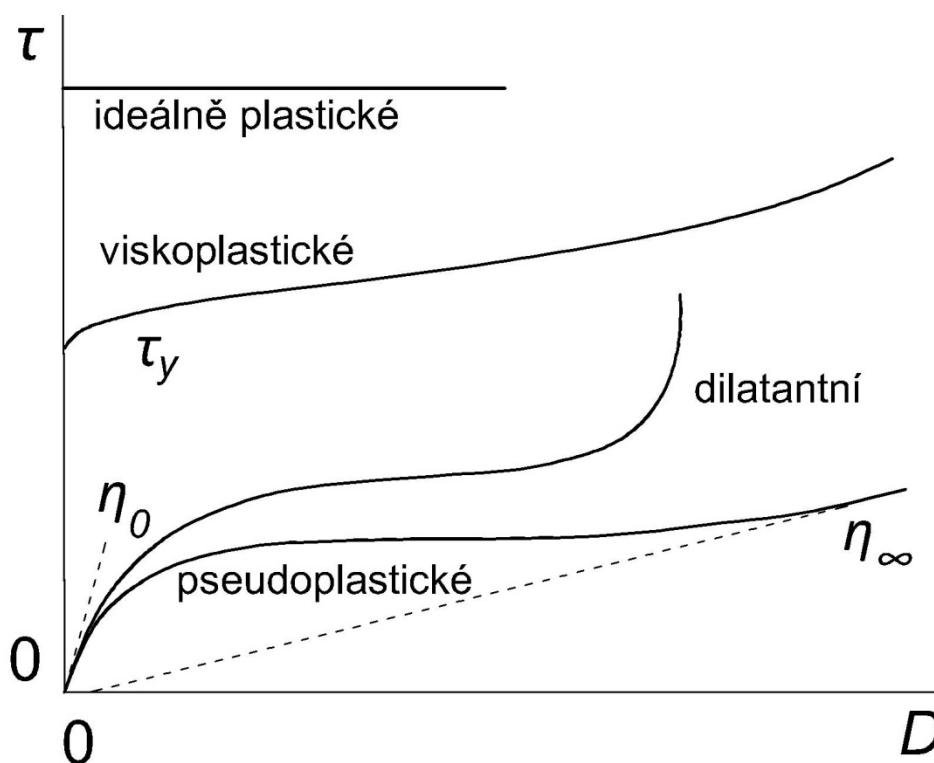
Kde: τ je tečné napětí

η je zdánlivá (smyková) viskozita, která závisí na rychlosti deformace nebo tečném napětí. Pro newtonské kapaliny nebo pro tzv. *prosté kapaliny* při dostatečně nízkých smykových rychlostech je materiálovou konstantou.

D je tzv. gradient rychlosti, který charakterizuje tvarové změny v proudící tekutině.

Vedle newtonských kapalin existují i kapaliny reologicky složitější, které se Newtonovým zákonem neřídí. Suspenze jsou multisložkové systémy (s průměrným obsahem pojiva v rozmezí 40 – 70%), kde ke studiu reologických vlastností je třeba znát tvar, velikost a koncentraci částic. [6, 20]:

Na obrázku č. 10 jsou schematicky ukázány základní typy neneutonských tokových anomálií a parametry, které anomální chování kvantitativně charakterizují.



Obr. 10: Na grafu je patrné chování jednotlivých kapalin. [6]

Rozlišují se tři základní typy neneutonských kapalin. Nejběžnějším typem neneutonských kapalin jsou kapaliny pseudoplastické, u nichž viskozita klesá s rostoucím napětím, resp. smykovou rychlostí. Z technického pohledu je pseudoplasticita zpravidla vítanou vlastností poněvadž snižuje energetickou náročnost např. při míchání. Dále dilatantní kapaliny, jejichž zdánlivá viskozita roste s rostoucím gradientem rychlosti a Binghamské kapaliny, tj. kapaliny s plastickou složkou deformace, u nichž dochází k toku až po překročení určitého prahového smykového napětí, tzv. meze toku [20, 21, 6]

Existují také kapaliny s časově závislou složkou deformace, které mění zdánlivou viskozitu s dobou působení napětí. Jejich tokové křivky jsou hysterezní, průběh při zvyšování napětí se liší od průběhu při jeho snižování. Rozlišují se dva základní typy: a) látky tixotropní, u nichž zdánlivá viskozita klesá s prodlužující se dobou působení napětí, b) látky reopexní, jejichž zdánlivá viskozita během smykového namáhání s časem roste [20,22].

K měření viskozity se běžně používají průtokové, pádové a rotační viskozimetry, které umožňují charakterizovat tokovou křivku neneutonských kapalin. V případě této

práce je použita metoda měření výtokové doby suspenze z Fordova pohárku podle normy ČSN EN ISO 2431. Problémy při měření viskozity suspenzí přináší nehomogenity měřeného vzorku (sedimentace). Je také nutno počítat s rušivým vlivem tixotropie nebo reopexie, poněvadž v takovém případě závisí výsledná toková křivka na době měření. Vždy před měřením reologických parametrů neneutonské kapaliny je proto nutné se přesvědčit, zda se nejedná o látku s časově závislou složkou deformační rychlosti. V této souvislosti je třeba upozornit také na jev, který se často projevuje u neneutonských kapalin, a který je možno snadno zaměnit s tixotropií nebo reopexií. Některé roztoky přírodních makromolekulárních látek (např. želatiny) mění reologické parametry s časem samovolně, bez ohledu na působení tečného napětí. Údaj zdánlivé viskozity, změřený na jednoduchém viskozimetru bez udání tečného napětí nebo rychlostního gradientu, může sloužit pouze pro orientační srovnání konzistence neneutonských kapalin stejného druhu měřené na stejných přístrojích a za stejných podmínek [20,22].

Tixotropie je charakterizována pozvolným poklesem viskozity v čase při mechanickém namáhání (tj. při rostoucím smykovém napětí) s následným obnovením struktury po odlehčení. O tixotropii se ovšem hovoří v případě, že zmíněné změny konzistence probíhají za konstantní teploty, a že vzhledem k mechanickému působení se jedná o vratné změny. Tixotropní systém může mít vratné chování, při kterém ustálené hodnoty smykové rychlosti a napětí nezávisí na předchozí historii. V tom případě lze naměřit rovnovážnou viskozitní funkci. Existují však i komplikovanější případy, kdy systém je autonomní, avšak vykazuje konečnou hysterezi i při velice pomalých změnách smykové rychlosti (není tedy vratný). [6]

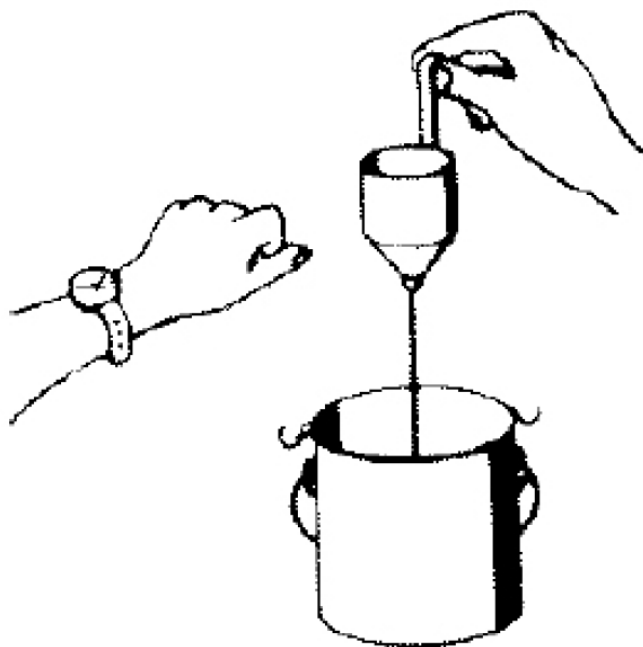
Sedimentace je proces, kdy působením gravitace dochází u nestejnorodých kapalných systémů s částicemi dispergované fáze k samovolnému oddělování kapaliny a částic. Pokud je hustota dispergované fáze větší než hustota disperzního prostředí, usazují se suspendované částice na dně nádoby. Naopak, je-li hustota prostředí větší než hustota dispergované fáze, stoupají rozptýlené částice k povrchu. Shlukování částí působením gravitace se nazývá usazování (sedimentace). Rychlost usazování závisí na velikosti částic, rozdíl hustot obou fází a teploty. [8]

Není snadné jednoznačně definovat vhodné metody pro stanovení reologie alkalicky-aktivovaných pojiv z toho důvodu, že jejich viskozita je často velmi rozdílná (od relativně hustých až po velmi tekuté). Co více, ve stavební praxi nejsou geopolymery téměř vůbec používány a tudíž neexistují ani normy pro jejich zkoušení. Níže zmíněné metody byly vybrány z ostatních odvětví jako nejvhodnější pro zkoušení reologie geopolymerních pojiv.

4.1 FORDŮV POHÁREK

Zkouška Fordovým pohárkem je jednoduchá orientační zkouška, vhodná k testování tekutějších suspenzí. Zkouška vychází z normy ČSN EN ISO 2431. Je založena na době průtoku určitého množství kapaliny přesně stanoveným průměrem hrdla pohárku.

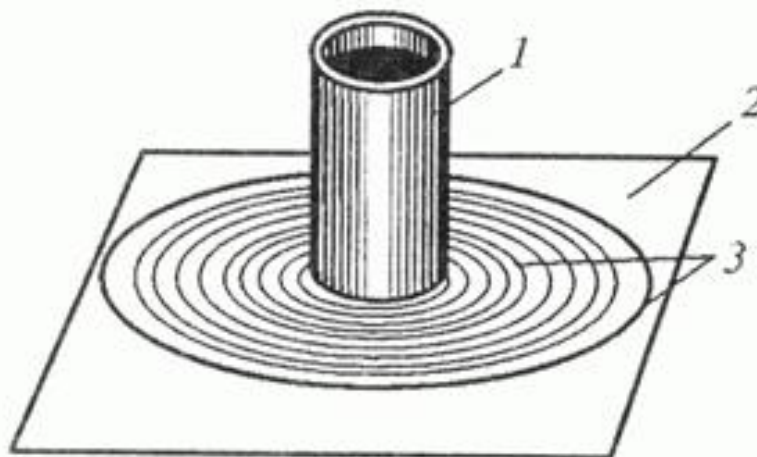
Fordův pohárek musí být předem celý ovlhčený. Ústí pohárku se zacpe, testovaná suspenze se nalije do pohárku až po okraj a současně se spuštěním stopek se uvolní hrdlo pohárku tak, aby začala kapalina volně vytékat. Výsledkem zkoušky je doba, po kterou trvá vytečení celého objemu kapaliny z pohárku.



Obr. 11: Na obrázku je schématický nákres použití Fordova pohárku.

4.2 ROZLITÍ VÁLEČKEM

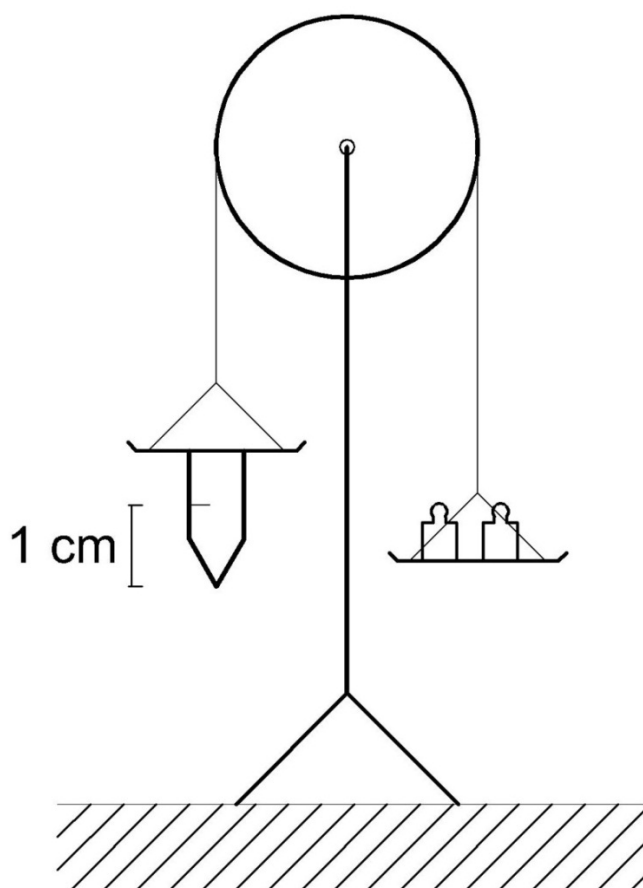
Zkouška se provádí na čistém navlhčeném skle s navlhčeným válečkem z nerezavějícího kovu s hladkým vnitřním povrchem výšky 100 mm a průměru 50 mm. Váleček se přidrží na skle a naplní se testovanou kapalinou až po okraj. Následně se váleček jedním pohybem zvedne a vzorek kapaliny se nechá volně roztéci po skle. Váleček se odloží stranou. Po třiceti sekundách od zvednutí válečku se změří dva na sebe kolmé průměry rozteklé suspenze. Výsledkem je průměr z těchto dvou hodnot. Metoda ve své podstatě částečně odpovídá normě ČSN 72 2301 pro testování normální konzistence sádry.



Obr. 12: soustava pro metodu rozlití válečkem: 1 - váleček o stanovených rozměrech, 2- podkladní sklo, 3 – stupnice, z které se odečítá rozlití.

4.3 HMOTNOSTNÍ PENETRACE

Zkouška je založena na velikosti váhy závaží, které je nutné, aby se jehlánek zanořil do zkoušené suspenze právě o jeden centimetr. Aparatura má dvě ramena, která musí být na počátku zkoušky v rovnováze. Vybalancování ramen se dociluje přidáním nebo ubráním závaží na druhém rameni. Hrot ovlhčeného jehláneku se musí na začátku měření dotýkat hladiny suspenze. Poté se přidávají závaží nad jehlánek do té doby, než klesne právě o požadovaný jeden centimetr do kapaliny. Výsledkem zkoušky je hmotnost, která zapříčinila ponoření jehláneku do hloubky o jeden centimetr pod hladinu suspenze.



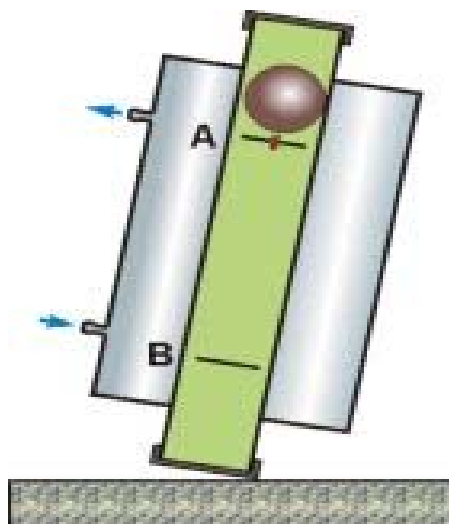
Obr. 13: Schéma znázorňuje princip přístroje určeného ke zjišťování hmotnostní penetrace

4.4 REOMETRY

Reometry jsou složitější zařízení sloužící ke zjištění viskozity kapalin. Jejich výstupy z měření se následně musí dopočítávat, abychom zjistili viskozitu kapaliny. Existuje několik typů reometrů.

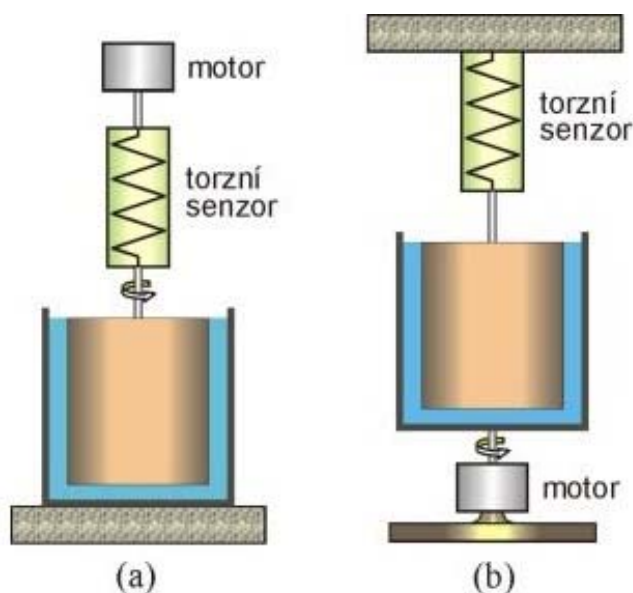
Výtokové reometry měří objemový průtok neboli dobu výtoku. Lze měnit výtokovou kapiláru i měřený objem. Jako příklad výtokových reometrů může být Sayboltův reometr nebo Fordův pohárek, se kterým pracuji v experimentální části (více v části Fordův pohárek). Výhodou těchto typů zařízení je relativní přesnost a jednoduchost.

Pádové (tělískové) reometry je založen na měření rychlosti pádu kuličky v kapalině. Kulička má známé rozměry a hustotu. Z toho lze následně spočítat odporovou sílu. Metoda je však méně přesná a je nutno mít na mysli, že výsledky silně záleží na typu zvolené kuličky. Měření umožňuje zjistit pouze zdánlivou viskozitu. Mezi zástupce této metody lze jmenovat Stokesův a Hoesplerův reometr.



Obr. 14: Schéma znázorňující princip pádového reometru s kuličkou.

Principem rotačních viskozimetrů je zjišťování velikosti momentu síly, který musí rotující těleso ponořené do kapaliny překonávat. Velikost tohoto momentu závisí na úhlové frekvenci rotujícího tělesa, dynamické viskozitě a charakteristické konstantě, která je specifická pro každý přístroj. Rotace tělesa musí být tak rychlá, aby nedošlo k turbulentnímu proudění. Standardní konstrukcí přístroje je nádoba válcového tvaru, do které je ponořen další rotující válec, anebo kombinace kužel-deska. Výhodou rotačních viskozimetrů je to, že jsou schopny měřit viskozitu i neneutronovských kapalin. [6, 31]



Obr. 15: Na schématu jsou dva reometry a) systém s otáčivým vnitřním válcem; b) systém s otáčivým vnějším válcem.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V roce 2013 jsem se zúčastnil na Kievské národní univerzitě stavebnictví a architektury sedmiměsíční stáže u prof. Krivenka. Mojí hlavní náplní zahraniční stáže byla právě práce s alkalicky aktivovanými pojivy, jejich reologické zkoušení a následná aplikace.

5 METODIKA PRÁCE

V rámci experimentální náplně bakalářské práce bylo testováno šest základních receptur na viskozitu a tuhnutí pojiva v čase. Výchozí receptura je receptura G1, její modifikací se tvořily receptury ostatní (viz tabulka níže).

Cílem všech experimentů bylo vybrat takovou recepturu, která by svými vlastnostmi v čerstvém i vytvrzeném stavu splňovala požadavky pro budoucí aplikaci na speciálních tepelných zařízeních, kterým může být např. tepelný zásobník. Mezi základní požadavky, které musela receptura splňovat a které bylo potřeba otestovat, patřily zejména:

- Vyhovující reologické vlastnosti k dosažení snadné aplikace.
- Zachování dostatečné pevnosti a soudržnosti materiálu.
- Co nejnižší součinitel tepelné vodivosti λ , tudíž i objemová hmotnost.
- Ověření funkčnosti materiálu v praxi.

| RECEPTURA POJIVA | SLOŽKA | MNOŽSTVÍ |
|------------------|---|----------|
| G1 | Metakaolin | 246 g |
| | Křemelina | 100 g |
| | Vodné sklo | 650 ml |
| | NaOH | 4 g |
| G2 | Vodné sklo | 650 g |
| G3 | Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O | 30 g |
| G4 | Močovina | 8 g |
| G5 | 20 % Roztok celulózy | 20 g |
| G6 | Kaolin | 246 g |

Tabulka 1: Složení jednotlivých receptur.

5.1 PŘÍPRAVA ALKALICKY AKTIVOVANÉHO POJIVA

Příprava alkalicky-aktivovaného pojiva probíhala s každou recepturou mírně odlišně.

Základní, tj. receptura G1, se připravovala odměřením 650 ml vodného skla (silikátový modul $M_s=3,0$, hustota $\rho=1430\pm 10 \text{ kg/m}^3$) [29] a v něm následným rozpuštěním hydroxidu sodného. Mezitím bylo odváženo 246 g metakaolinu, respektive kaolínu pro G6, a 100 g křemeliny. Vážení probíhalo s přesností na celé gramy. Po rozpuštění hydroxidu sodného ve vodném skle byl opatrně (z důvodu velké prašnosti) přidáván a ručně rozmícháván metakaolin a křemelina. Po přidání celého sypkého podílu se směs míchala kuchyňským mixérem po dobu jedné minuty. Pokud se jednalo o další receptury, chemikálie ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, 20 % roztok celulózy, močovina) byly rozpouštěny v 50 g ohřáté vody a přidávány k vodnému sklu. Potom byl teprve přidáván metakaolin nebo kaolin s křemelinou. Na směsích byly okamžitě provedeny zkoušky reologie.



Obr. 16: Příprava alkalicky aktivovaného pojiva. Vpravo se nachází rozmíchané vodní sklo s rozpuštěným hydroxidem sodným, vlevo jsou odvážené sypké materiály – křemelina s metakaolinem.

5.2 ZKOUŠENÍ REOLOGIE ALKALICKY AKTIVOVANÉHO POJIVA

Reologie alkalicky aktivovaného pojiva byla zkoušena třemi jednoduchými metodami. Hledala se receptura, která by byla schopná spojit co největší množství plniva, přičemž by byla dobře zpracovatelná.

5.2.1 Fordův pohárek

První zkouškou bylo měření času průtoku směsi Fordovým pohárkem. Zkouška byla prováděna dle standardů ČSN EN ISO 2431 po dobu dvou hodin od zamíchání každých patnáct minut. Více v teoretické části této práce v kapitole 4.1. Před každým měřením byla směs opakovaně minutu promíchávána kuchyňským robotem na vysoké otáčky. Zařízení s Fordovým pohárkem je znázorněno na obr. 17. U této metody se hledala směs s dobou průtoku cca jedné minuty.



Obr. 17: Fotka zachycující aparaturu Fordova pohárku se stopkami.

5.2.2 Rozlití válečkem

Druhou zkouškou bylo stanovení rozlití válečkem po dobu dvou hodin. Princip metody je popsán v kapitole 4.2. Zkouška byla prováděna na skle dostačující čistoty, což je naprosto zásadní pro objektivní výsledky zkoušky. Průměr použitého válečku byl 5 cm, výška byla 10 cm. Teoretický objem tedy byl $0,196 \text{ dm}^3$. Měření probíhalo ve dvou na sebe kolmých rozměrech s přesností na milimetry. Testování probíhalo v intervalu patnácti minut během dvou hodin, přičemž směs byla před každým měřením promíchávána kuchyňským robotem. Názorná ukázka měření rozlití je na obrázku 18. Hledala se směs takové konzistence, u které by nebylo viditelné oddělování vodného skla od sypkých částic a která by měla rozlití od 30 do 35 cm.



Obr. 18: Snímek zachycuje rozlití alkalicky aktivovaného pojiva.

5.2.3 Hmotnostní penetrace

Poslední zkouškou byla hmotnostní penetrace. Metoda byla prováděna podle popisu v teoretické části této práce v kapitole 4.3. Jak je patrné na obr. 19, aparatura nebyla zdaleka vyhovující. Zamotaný provázek měl tendenci se zadržovat ve žlábků kolečka. Samotné kolečko se netočilo dostatečně volně. Také miska při vyvažování měla tendence se naklánět a rotovat. K tomu všemu stupnice, ze které se odečítalo potřebné ponoření jehláčku, nebyla dostatečně viditelná. Dále miska, která sloužila

k odečítání ponoření (ve skutečnosti vršek od mléka), neměl dostatečně rovnou hranu natolik, aby se dala změřená hodnota objektivně odečíst. Podobně jako u zkoušky tuhnutí cementu se při opakování zkoušky nesmí vpich provádět do stejného místa.



Obr. 19: Zkouška hmotnostní penetrace alkalicky aktivovaného pojiva. Levá miska slouží k vyvážení ramen před započítím zkoušky. Pravé rameno se zanořuje do zkoušeného geopolyméru.

5.3 ZKOUŠENÍ VLASTNÍ SOUDRŽNOSTI A PŘÍDŽNOSTI MATERIÁLU K PODKLADU

Následně, po provedení zmíněných testů reologie, se zkoušela vlastní soudržnost materiálu a přídržnost k podkladu. Snaha byla o co nejmohodnější napodobení podmínek prostředí pro nadcházející aplikaci na tepelné zařízení. Z provedených reologických zkoušek se jako nevhodnější pojivo jevila receptura G6, ke které byl přidán jako tepelně izolační plnivo expandovaný perlit, viz tabulka níže.

| | SUROVINA | MNOŽSTVÍ [g] |
|-------------------------|---|----------------|
| RECEPTURA G6 | Metakaolin | 246 |
| | Vodní sklo | 650 ml ~ 930 g |
| | Křemelina | 100 |
| | NaOH | 4 |
| | Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O | 30 |
| | 20 % Roztok celulózy | 20 |
| | Močovina | 8 |
| PLNIVO | Expandovaný perlit (max. zrno 2,5 mm) | 280 |
| | Expandovaný perlit (frakce 0,14 – 2,5 mm) | 186 |

Tabulka 2: Vyobrazení složení testovaného tepelně izolačního materiálu. [29]

Zkouška soudržnosti se provedla tak, že se geopolymerné pojivo rozmíchalo s perlitem o frakci v hmotnostním poměru 3:1 (75 % pojiva, 10 % expandovaného perlitu frakce 0,14 – 2,5 mm, 15 % expandovaného perlitu s maximálním zrnem 2,5 mm) a naplnilo do kruhové formy. Plnění probíhalo jednorázově. Hutnění se provedlo pouhým přimáčknutím špachtle. Forma byla ihned sejmuta a vzorek byl vložen na 24 hodin do zrací komory, ve které byla teplota 100 °C. Výsledný vzorek je zobrazený na obrázku č. 20. Posouzení bylo vizuální. Hlídala se zejména soudržnost a oddolování částec perlitu od zbytku vzorku.



Obr. 20: Zkoušení vlastní soudržnosti alkalicky aktivovaného pojiva s přidavkem perlitu jako tepelně izolačního plniva.



Obr. 21: Vyhotovené trámečky, které sloužily ke zjištění míry soudržnosti tepelně izolačního materiálu k ocelovému podkladu.

Další zkouškou bylo zjištění přídržnosti vzorku k oceli. Zkouška probíhala obdobně jako předchozí. Na ocelovou destičku byla rozetřena tenká vrstva geopolymery stejného složení ke zvýšení větší přídržnosti. Ten se nechal mírně zavadnout a

přistoupilo se k nanesení vlastního tepelně izolačního vzorku tak, že se na ocelový podklad vytvořila dřevěná šablona ve tvaru obdélníku o rozměrech 40×40×160 mm. Ta se naplnila stejným vzorkem geopolymery s perlitem. Opět se přimáčkla špachtlí. Poté byla šablona odňata a vzorek se okamžitě přemístil do zrací komory na 24 hodin. Posouzení bylo opět vizuální. Znovu se hlídalo, jestli se vzorek výrazně neoddroluje, anebo neodlepuje od ocelového podkladu. Výsledný trámeček je vyobrazen na snímku č. 21.

5.4 OVĚŘOVÁNÍ FUNKČNOSTI MATERIÁLU V PRAXI

Posledním krokem bylo praktické otestování funkčnosti tepelně izolačního materiálu v závodě Rosava ve městě Bílá Cerkev na speciální tepelné zařízení (formátor pneumatik). Teplota povrchu po nanesení tepelně izolačního materiálu neměla přesáhnout 45 °C, přičemž vnitřní teplota vulkanizátoru byla 180 °C. [29,30] Po odstranění staré vrstvy karcinogenní azbestocementové izolace se ocelový povrch válečkem natřel geopolymery k docílení větší přídržnosti materiálu, stejně, jako proběhlo zkoušení v laboratoři. Následně se aplikovala tepelně izolační vrstva, která se skládala z vybrané receptury a expandovaného perlitu v zastoupení stejném jako při zkoušení soudržnosti, viz kapitola 5.3. Nanášelo se špachtlemi, kterými se materiál přimáčkával k podkladu. Materiál bylo potřeba nanášet opatrně z toho důvodu, že měl tendence se oddělovat a odpadávat. Tloušťka nanesené vrstvy byla v průměru 3,5 cm. Výsledné vlastnosti zvolené receptury po provedení všech zkoušek jsou znázorněny v následující tabulce. Hodnoty jsou získány z [32].

| VLASTNOST | JEDNOTKA | HODNOTA |
|--|-------------------|----------------|
| Součinitel tepelné vodivosti λ | W/(m·K) | 0,068 |
| Objemová hmotnost | Kg/m ³ | 296 |
| Pevnost v tlaku | MPa | 0,11 |
| Soudržnost k podkladu | MPa | 1,15 |

Tabulka 3: Popis vlastností výsledného tepelně izolačního materiálu.



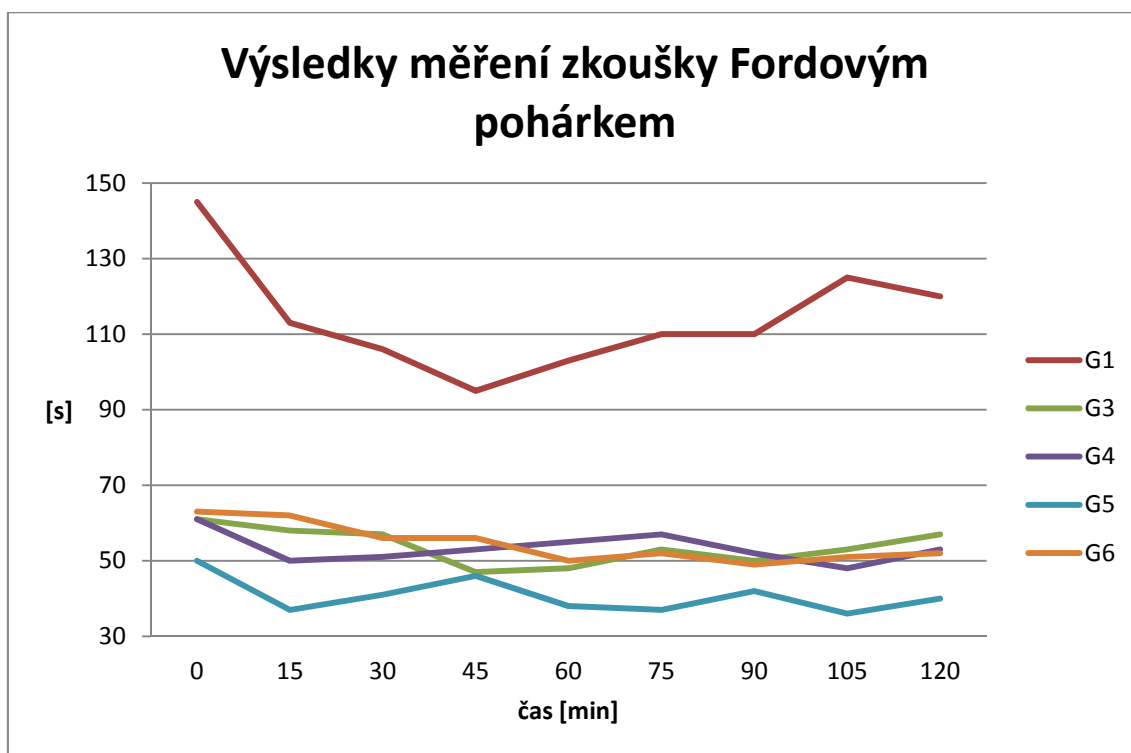
Obr. 22: Snímek zachycuje primární nátěr ocelového povrchu formátoru pneumatik po sejmutí staré izolace a před nanesením tepelně izolační vrstvy.



Obr. 23: Vlastní aplikace tepelně izolačního materiálu.

6 DISKUZE VÝSLEDKŮ

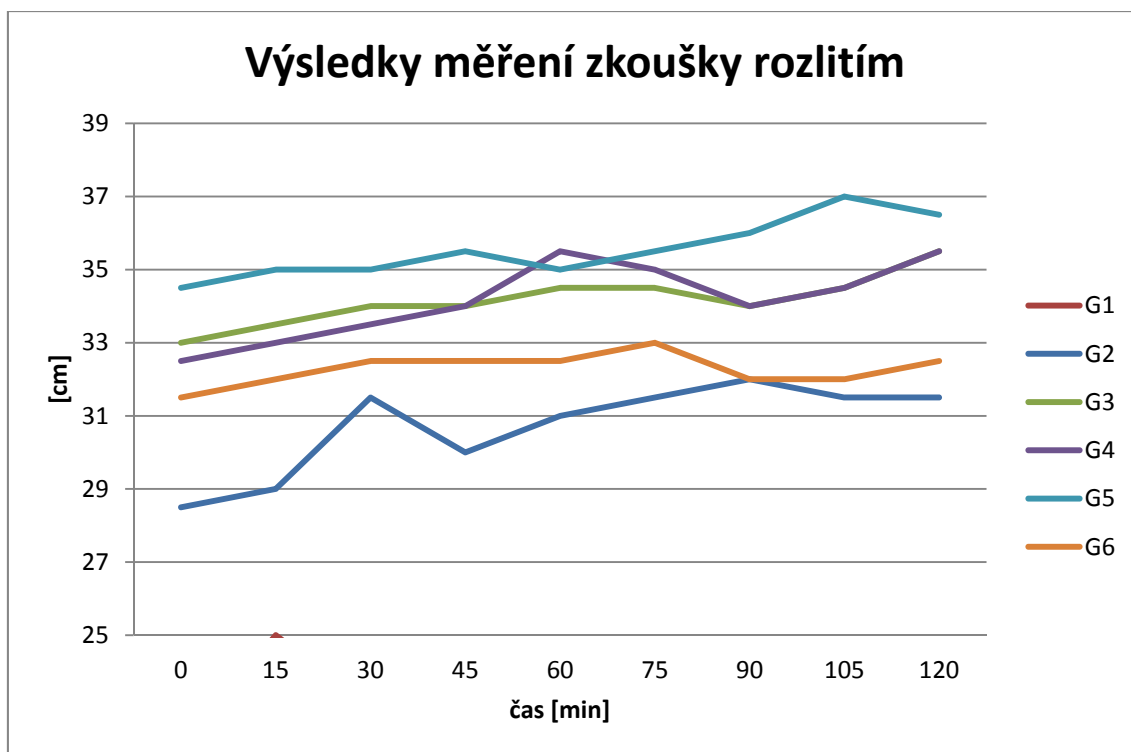
Zkoušení reologie Fordovým pohárkem dává okamžité a objektivní výsledky. Stejně jako rozlití válečkem se jedná o jednoduchou zkoušku, možnou bez problémů provádět na stavbě „in situ“. Pokud nebyla směs před provedením zkoušky dokonale promíchaná, často docházelo k ucpání hrdla pohárku. V takovém případě bylo nutno zkoušku opakovat. Receptura G2 byla natolik viskózní, že ústím pohárku vůbec neprotekla, proto ani nebyla do výsledného grafu zařazena. Je to patrně způsobeno tím, že vodní sklo bylo namísto odměření odvažováno, takže ho ve výsledku bylo méně a s tím klesla i tekutost směsi. Nejvhodnější recepturou se jevila receptura G6, která vykazovala optimální dobu průtoku.



Obr. 24: Graf zobrazující výsledky z měření Fordovým pohárkem.

Ve výsledcích zkoušky rozlitím je patrný rozdíl v tekutosti u receptury G2, která byla výrazně viskóznější než ostatní. Důležité bylo podkladní sklo po každé zkoušce pečlivě očistit, jinak se směs měla tendenci o tyto nečistoty brzdit a blokovat. K tomu byla směs obzvláště choulostivá. Na rozlití bylo také hned patrné, jak se má rozpuštěné vodné sklo tendenci separovat od přidaných práškových látek. Nejde o nijak markantní jev, avšak je třeba si jej všimnout. Tento způsob zkoušení reologie

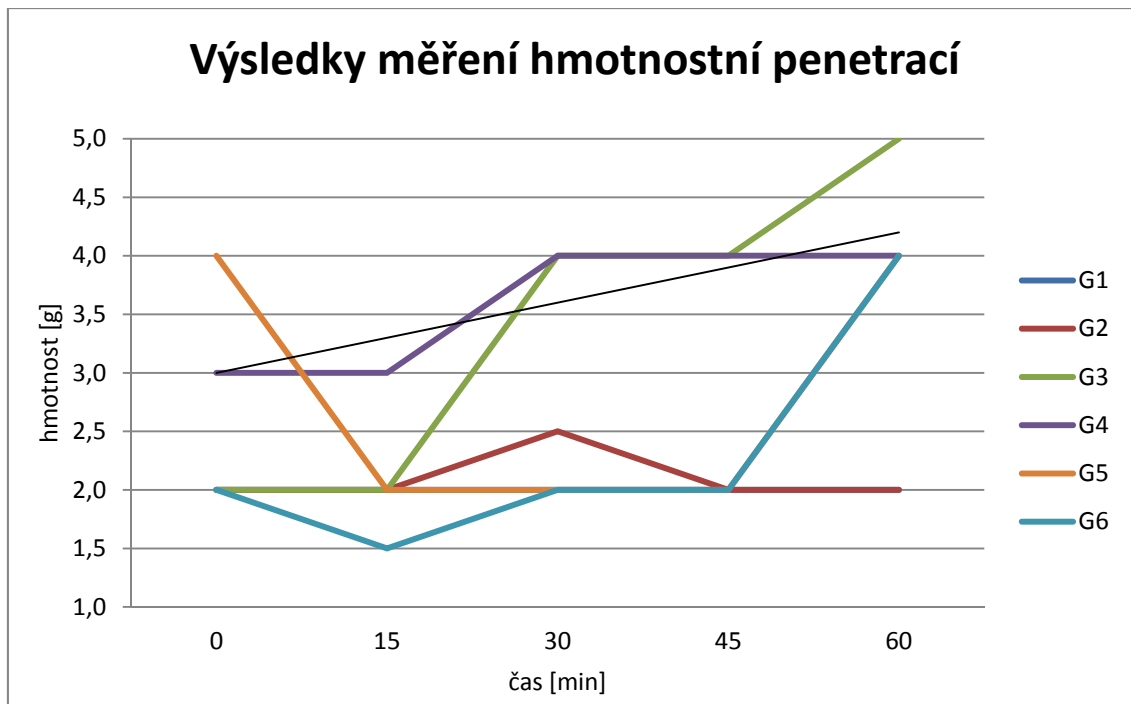
alkalicky-aktivovaných pojiv hodnotím jako vhodný, jednoduchý a objektivní. Podle mého pohledu chybí nějaká stupnice, do které by se daly výsledky zařadit.



Obr. 25: Graf zobrazující výsledky měření metodou rozlití válečku.

Hmotnostní penetrace se nezdá být příliš vhodnou zkouškou pro tekuté směsi, jako jsou alkalicky aktivovaná pojiva. Pokud je zkoušená směs příliš tekutá, je těžké už pouze to, aby se hrot jehláčku dotýkal hladiny kapaliny. Jehláček má tendenci se neustále kymáčet ze strany na stranu, nebo se zanořovat vlivem povrchového napětí kapaliny. Další velikou nevýhodou této metody je její nepřesnost. Pokud se závažička nepokládají velice opatrně, snadno dojde k většímu zanoření než je požadovaný jeden centimetr. Z toho následně plyne nutnost opakovat zkoušku. Díky vlastnostem látky se během doby zkoušení na povrchu hladiny vytvářela tenká vrstvička již ztuhlého materiálu, která zabraňovala hlubší penetraci. Při dalším zatěžování se tedy stávalo, že došlo k jejímu protržení a jehláček se zanořil více, než bylo žádoucí. Z těchto důvodů se mi metoda jeví jako nejméně vhodnou k testování podobných materiálu. Výsledky, které jsme dostali, nepovažuji za objektivní. Metoda je vhodná ke zkoušení tužších směsí, jako např. cementové pasty. Řešením by mohlo být větší provedení jehláčku. Pokud by byl vyroben výrazně větší a penetrace by se neprováděla pouze jeden centimetr, nýbrž např. deset, výsledky by mohly být objektivnější. Také materiál válečku by mohl být měnitelný. Kdyby se vyrobil

z materiálu, který je výrazně lehčí než nerezová ocel, metoda by se také výrazně zpřesnila.



Obr. 26: Graf zobrazující výsledky z metody hmotnostní penetrace.

Co se viskozity týče, nejvhodnější recepturou se jevila směs G6 (podle výsledků z měření Fordovým pohárkem a rozlití válečkem), z toho důvodu byla také vybrána a použita pro další testování vlastností. V kombinaci s expandovaným perlitem dokáže tvořit materiál dobrých tepelně izolačních vlastností a dostatečných pevností a soudržnosti. Tyto vlastnosti předurčují materiál i k použití na vertikálních zařízeních. To bylo prověřeno a potvrzeno při aplikaci na formátoru pneumatik v závodě Rosava. Hlavní požadavek, kterým bylo nepřekročení teploty 45 °C na povrchu formátoru, byl splněn. [29,32]

Negativní vlastností je špatná aplikace materiálu. V čerstvém stavu má tendence se během nanášení často oddělovat a tudíž roste jeho spotřeba. To v důsledku přináší neefektivní využití materiálu a zvýšení nákladů.

ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na uvedení čtenáře do problematiky geopolymerních pojiv s důrazem na zkoušení jejich reologických vlastností. Byly srovnány jednotlivé zkušební metody, přičemž metoda Fordova pohárku a metoda rozlití válečkem se jeví jako vhodné na rozdíl od metody hmotnostní penetrace. Byla nastíněna i možnost jejího vylepšení metody hmotnostní penetrace pro zkoušení viskozity.

Závěrem práce byla vybrána nejvhodnější receptura k praktické aplikaci pro použití na různých tepelných zařízeních, od vulkanizátoru až po tepelné zásobníky, jejichž vlastnostmi a rozdělením se práce zabývala zpočátku. Byly také uvedeny příklady již existujících tepelných zásobníků, které by v budoucnu mohly být zatepleny tepelně izolačním materiálem, který práce zkoumá ve své experimentální části.

Následující práce by se měly zabývat zjišťováním viskozity pomocí reometrů, aby se získaly matematické výsledky, které by se snad daly snáz normalizovat.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Hassan E. Fath. *Technical assessment of solar thermal energy storage technologies: An International Journal*. Renewable energy. Elsevier Science Ltd, 1998, vol. 14, s 35-40.
- [2] Antoni GIL, Marc MEDRANO, Ingrid MARTORELL, Ana LÁZARO, Pablo DOLADO, Belén ZALBA a Luisa F. CABEZA. *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization: An International Journal*. Renewable and Sustainable Energy Reviews: power for a sustainable future. Oxford: Oxford University Press, 2010, vol. 14, issue 1, s. 31-55. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.035. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109001774>
- [3] SHARMA, Atul, V.V. TYAGI, C.R. CHEN a D. BUDDHI. *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009, vol. 13, issue 2, s. 318-345. DOI: 10.1016/j.rser.2007.10.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032107001402>
- [4] ORÓ, Eduard, Antoni GIL, Alvaro DE GRACIA, Dieter BOER a Luisa F. CABEZA. *Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants*. Renewable Energy. 2012, vol. 44, s. 166-173. DOI: 10.1016/j.renene.2012.01.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148112000195>
- [5] FIALOVÁ, Barbora a Pavel ROVNANÍK. Odborný seminář Metakaolin 2014: *Vliv přítomnosti uhlíkových nanotrubiček v geopolymerech na bázi metakaolinu*. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně: SUPMAT, 2014. ISBN 978-80-214-4881-0
- [6] WEIN, Ondřej. *Úvod do reologie*. Brno, 1996. Chemická fakulta VUT v Brně.
- [7] LACH, Vladimír. *Keramika*. 3. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. 172 s. ISBN 80-214-0332-2.
- [8] BODNÁROVÁ, Lenka. *Základy technologických procesů*. Brno, 2006. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

- [9] HELA, Rudolf. *Technologie betonu I*. Brno, 2005. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [10] ŠKVÁRA, F. *Alkalicky aktivované materiály - geopolymery*. Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-004-1. Dostupné z: <http://www.vscht.cz>. VŠCHT v Praze, Ústav skla a keramiky.
- [11] KALINA, Ing. Lukáš. *Syntéza aluminosilikátových systémů na bázi geopolymérů orientovaná na využívání sekundárních surovin*. Brno, 2011. Zkrácená verze doktorské práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Chemická, Ústav chemie, technologie a vlastností materiálů. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
- [12] BRANDŠTETR, J. a P.V. KRIVENKO. *Alkalické cementy a betony*. SILIKA. 1999, 26 – 28.
- [13] PROVIS, John L a Jan Stephanus Jakob VAN DEVENTER. *Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009, xiv, 454 pages. Woodhead Publishing in materials. ISBN 14-398-0970-4.
- [14] SOKOLÁŘ, Radomír. *Keramika*. Brno. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] Claypolymers. *Chemická podstata hmoty* [online]. 2008 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.claypolymers.com/cz/clay-polymer/podstata-hmoty.html>
- [16] Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: *Možnosti aplikace alkalicky aktivovaných systémů ve stavebnictví* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.fast.vsb.cz/export/sites/fast/cs/veda-a-vyzkum/odborna-cinnost-fakulty/sbornik-vedeckych-praci/archiv-vydanych-sborniku/sbornik-vsb-tuo-fast-2012-2.pdf>
- [17] Glukhovskiy, V. D. *Slag-alkali concretes produced from fine-grained aggregate*. Kiev, USSE: Vyssha Shkola Publisher, 1981.
- [18] RINNOVÁ, Martina. *Studium vlivu složení alkalického aktivátoru na vlastnosti geopolymerních materiálů*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.

- [19] BOCH, Philippe, NIEPCE Jean-Claude. *Ceramic Materials: Processes, Properties, and Applications*. London Wiley, 2007, 573 s., ISBN-13: 978-1905209231
- [20] PIRKL Slavomír. *Reologie a reometrie kapalin, ústav aplikované fyziky, universita Pardubice*[Online], Poslední aktualizace 29.3.2011, [cit. 2014-05-14] <kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc>
- [21] ŠENK, Bc. Vít. *Keramické porézní materiály - příprava, struktura a vlastnosti*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce prof. RNDr. Jaroslav Cihlář, CSc.
- [22] BARTOVSKÁ, Lidmila, ŠIŠKOVÁ, Marie. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. 5. vydání. Praha: VŠCHT Praha, 2005. ISBN 80-7080-579-X.
- [23] DROCHYTKA, Rostislav. *Lehké stavební látky*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 1993, 124 s. ISBN 80-214-0514-7.
- [24] Foamglass. Unikátní technické vlastnosti [online]. 1999 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: http://www.foamglas.cz/unik_vlastnosti.htm
- [25] Tachtech: Žáruvzdorné materiály. Kalciumsilikátové desky - pro zadní izolaci [online]. 2014 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.tachtech.cz/cz/produkty/zaruvzdorne-materialy/kalciumsilikat/101-kalciumsilikatove-desky-pro-zadni-izolaci-do-1100-c.html>
- [26] Torresol Energy: Gemasolar thermosolar plant. Plants [online]. 2010 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/gemasolar-plant/en>
- [27] Torresol Energy: Valle 1 and Valle 2 thermosolar plants. Plants [online]. 2010 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/gemasolar-plant/en>
- [28] KALINA, Ing. Lukáš. *Syntéza aluminosilikátových systémů na bázi geopolymérů orientovaná na využívání sekundárních surovin*. Brno, 2011. Zkrácená verze doktorské práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie, technologie a vlastností materiálů. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.

- [29] PETRÁNEK, Vít, Sergii GUZII, Pavlo KRYVENKO, Konstantinos SOTIRIADIS a Jan MAŇÁK. *Use of Thermal Insulating Perlite Composite Materials Based on Geocement to Protect Technological Equipment*. Advanced Materials Research. 2013, 860-863, s. 1342-1345. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.1342. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.860-863.1342>
- [30] GUZII, Sergei a Jan MAŇÁK. *Zaizolování průmyslového zařízení tepelněizolační vrstvou*. Stavební materiály, výroby a sanitární technika. 2013, č. 47. rusky
- [31] LÁN, Radek. *Konstrukce nízkotlakého pístového reometru*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Jakub Roupec, Ph.D.
- [32] GUZIY, Sergei, PETRÁNEK, Vít, SOTIRIADIS Konstantinos, NEVŘIVOVÁ Lenka. *Study on the properties of geocement based thermal insulationg materials for high temperature technical appliances*.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1: Na schématu je patrné rozdělení tepelných zásobníků na jednotlivé typy | 5 |
| Obr. 2: Na grafu je patrný rozdíl v množství pojmutoho tepla mezi sensiblním systémem a systémem latentním. Lze z něj též vyčíst teplotu skupenské přeměny média. | 7 |
| Obr. 3: Obrázek zobrazuje horní roh tepelného zásobníku o klasickém uspořádání vrstev..... | 8 |
| Obr. 4 Zde je zobrazen spodní roh tepelného zásobníku. | 9 |
| Obr. 5 Na obrázku můžeme vidět schéma principu elektrárny: 1 – sluneční zrcadla; 2 – zásobník pro chladné médium; 3 – receiver – místo, do kterého se sbíhají paprsky; 4 – zásobník pro ohřáté médium; 5 – výměník tepla; 6 – turbína; 7 – generátor; 8 – rozvodná síť | 12 |
| Obr. 6: Letecký snímek zachycující elektrárnu Gemasolar a její rozložení zrcadel kolem věže. | 12 |
| Obr. 7: Schéma popisující princip elektrárny. Sluneční paprsky, které se odrážejí od parabolických zrcadel jsou koncentrovány na trubku, v níž se ohřívá médium. Ohřáté médium potom putuje buď do tepelného zásobníku, nebo rovnou k výrobě páry. Vše ostatní je již prakticky shodné s klasickými uhelnými, nebo jadernými elektrárnami. | 13 |
| Obr. 8: Zrcadla směřující sluneční záření do jednotného ohniska, kde dochází k ohřátí média..... | 14 |
| Obr. 9: Zjednodušené schema průběhu tvorby gelu a tvrdnutí geopolymery. [13,18] | 18 |
| Obr. 10: Na grafu je patrné chování jednotlivých kapalin. [6]..... | 22 |
| Obr. 11: Na obrázku je schématický náčrt použití Fordova pohárku..... | 24 |
| Obr. 12: soustava pro metodu rozlití válečkem: 1 - váleček o stanovených rozměrech, 2- podkladní sklo,3 – stupnice, z které se odečítá rozlití. | 25 |
| Obr. 13: Schéma znázorňuje princip přístroje určeného ke zjišťování hmotnostní penetrace | 26 |
| Obr. 14: Schéma znázorňující princip pádového reometru..... | 27 |
| Obr. 15: Na schématu je patrný rozdíl principu dvou reometrů: a) systém s otáčivým vnitřním válcem; b) systém s otáčivým vnějším válcem | 27 |

| | |
|--|----|
| Obr. 16: Příprava alkalicky aktivovaného pojiva. Vpravo se nachází rozmíchané vodní sklo s rozpuštěným hydroxidem sodným, vlevo jsou odvážené sypké materiály – křemelina s metakaolinem..... | 29 |
| Obr. 17: Fotka zachycující aparaturu Fordova pohárku se stopkami..... | 30 |
| Obr. 18: Snímek zachycuje rozlití alkalicky aktivovaného pojiva. | 31 |
| Obr. 19: Zkouška hmotnostní penetrace alkalicky aktivovaného pojiva. Levá miska slouží k vyvážení ramen před započítáním zkoušky. Pravé rameno se zanořuje do zkoušeného geopolymery. | 32 |
| Obr. 20: Zkoušení vlastní soudržnosti alkalicky aktivovaného pojiva s přídavkem perlitu jako tepelně izolačního plniva..... | 34 |
| Obr. 21: Vyhotovené trámečky, které sloužily ke zjištění míry soudržnosti tepelně izolačního materiálu k ocelovému podkladu..... | 34 |
| Obr. 22: Snímek zachycuje primární nátěr ocelového povrchu formátoru pneumatik po sejmutí staré izolace a před nanesením tepelně izolační vrstvy..... | 36 |
| Obr. 23: Vlastní aplikace tepelně izolačního materiálu. | 36 |
| Obr. 24: Graf zobrazující výsledky z měření Fordovým pohárkem. | 37 |
| Obr. 25: Graf zobrazující výsledky měření metodou rozlití válečku. | 38 |
| Obr. 26: Graf zobrazující výsledky z metody hmotnostní penetrace..... | 39 |